

Universität für Bodenkultur
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Analyse einer stofflichen Verwertung von nicht-nachwachsenden Rohstoffen – am Beispiel von Eisenmetallen aus Haushaltsgütern

Masterarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von
Rainer Warrings
Stud Kennz.: H 066 471 / Matr. Nr.: 01140210

Wien, August 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln geahndet wird („Verwendung unerlaubter Hilfsmittel“) und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann.

Wien, Mai 2018

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'R' followed by a 'W' and a series of horizontal strokes, all underlined.

Kurzfassung

Weltweit steigt die Nachfrage nach Waren aller Art und damit der Bedarf an Rohstoffen zur Produktion von Gütern. Die Kreislaufwirtschaft (engl. *Circular Economy*) ist ein Konzept, bei dem die verwendeten Rohstoffe möglichst effizient eingesetzt und wieder in Produktionsprozesse zurückgeführt werden. Es stellt einer herkömmlichen, linearen Nutzung – im Sinne von nehmen, herstellen, verbrauchen, entsorgen – ein mehr integratives System zur Einsparung von Ressourcen gegenüber.

Im Rahmen des Circular Economy Packages der EU sind dazu Gesetzesvorschläge entstanden, die die Recyclingraten für Verpackungen und Siedlungsabfälle erhöhen sollen.

Österreich gilt als eines der Länder mit den höchsten Recyclingraten, u.a. auch bei der Rückgewinnung von Metallen. In der gegenständlichen Arbeit wurde eine Massenbilanz für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen in Österreich erhoben und die Abfallbehandlungsflüsse und -prozesse in einer Materialflussanalyse (MFA) dargestellt. Die Daten in der MFA basieren auf Berechnungen von öffentlich zugänglichen Abfallstatistiken und Abfallwirtschaftsplänen, sowie Berichten und Informationen von Sammel- und Verwertungsgesellschaften, Entsorgungs- und Abfallbehandlungsunternehmen. Fehlende Daten wurden aus der wissenschaftlichen Literatur oder Forschung ergänzt. Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) werden in den Abfallbilanzen separat ausgewiesen und Eisenmetalle aus EAG sind daher nicht Teil der Untersuchung.

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wurden im Jahre 2015 etwa 120.100 t Eisenmetalle (Verpackungen und andere Haushaltsgüter) in Österreich über den Siedlungsabfall entsorgt, wovon 110.700 t (92%) recycelt wurden. Der größte Anteil wurde dabei über die separate Sammlung zurückgewonnen (69%). Aus der Abfallaufbereitung konnten in der mechanischen Behandlung 10.100 t Eisenmetalle zurückgewonnen werden, wobei nach Abzug der Verluste durch etwaige Störstoffe oder Anhaftungen eine Rückgewinnung von etwa 90% aus der mechanischen Aufbereitung angenommen werden kann. Bei der Schlackenaufbereitung aus der Müllverbrennung werden nur 64% zurückgewonnen, hier entstehen demnach auch die höchsten Verluste (9.700 t). Anzunehmen ist, dass der Verbrennungsprozess zur Veränderung der Partikeloberfläche (z.B. Oxidation, Agglomerationen, Einschlüsse etc.) der Eisenmetall-Fraktionen führt und somit bei der Magnetabscheidung nicht oder zumindest nicht ausreichend detektiert werden.

Insgesamt ergibt sich dadurch ein theoretisches, derzeit nicht genutztes Rückgewinnungspotential von etwa 10.000 t Eisenmetallen pro Jahr mit einem Wert von fast 1,5 Mio. € pro Jahr. Die ab Ende 2020 EU-weit verpflichtenden Recyclingquoten von 70% für Verpackungen aus Eisenmetallen werden in Österreich mit 92% bereits übererfüllt.

Durch eine verbesserte separate Sammlung, sowie durch Investitionen in modernere Recyclingtechnologien (z.B. für Sortieranlagen in der Schlackenaufbereitung) könnten jedoch noch höhere Recyclingraten erzielt werden.

In Hinblick auf die Datengrundlage, die für die MFA herangezogen wurde, wird darauf hingewiesen, dass die verwendeten Daten von unterschiedlicher Qualität waren. Eine Verbesserung der Datenlage und -qualität, besonders was die Abfallzusammensetzung bezogen auf Nichtverpackungen und Gewerbeabfälle betrifft, wäre wünschenswert. Die Angaben zu Rückgewinnungsmengen und Verlusten aus der Abfallaufbereitung sind oftmals unzureichend und nur teilweise verfügbar.

Abstract

Worldwide, the demand for goods of all kinds and thus the demand for raw materials for the production of goods is increasing. The circular economy is a concept in which the materials are used as efficiently as possible and returned to production processes. It opposes a more traditional, linear use - in the sense of take, produce, consume, dispose of - a more integrative system for saving resources.

As part of the EU's circular economy package, legislative proposals have been drafted to increase the recycling rates of packaging and municipal waste.

Austria is considered one of the countries with the highest recycling rates, i.a. for the recovery of metals. In the present study, a mass balance was obtained for ferrous metals from municipal solid waste in Austria and the waste treatment flows and processes were determined by a material flow analysis (MFA). The data in the MFA are based on calculations of publicly available waste statistics and waste management plans, as well as on reports and information from recycling, disposal and waste treatment companies. Missing data has been supplemented by scientific literature or research.

As the results of this work show, 120,100 t of ferrous metals (packaging and other household goods) were disposed of via municipal waste in Austria in 2015, of which 110,700 t (92%) were recycled. The largest share was recovered through the separate collection (69%). From waste treatment, 10,100 t of ferrous metals were recovered from the waste treatment. After deducting the losses due to impurities or adhesives, a recovery of about 90% from the mechanical treatment can be assumed. Via bottom ash processing from municipal solid waste incineration, only 64% are recovered. Accordingly, the highest losses occur at bottom ash processing (9,700 t). It can be assumed that the combustion process leads to changes in the particle surface (for example oxidation, agglomerations, inclusions, etc.) of the iron metal fractions and thus is not or at least not sufficiently detected in the magnetic separation.

Overall, there is a theoretical, currently unused recovery potential of about 10,000 t of ferrous metals per year with a value of almost € 1.5 million per year.

The recycling rate of 70% for packaging made of ferrous metals, which will be mandatory across the EU from the end of 2020, has already exceeded 92% in Austria.

Improved separate collection, as well as investment in more advanced recycling technologies (e.g. sorting plants in bottom ash processing) could result in even higher recycling rates.

The data used for the MFA were of varying quality. Especially with regard to the waste composition in terms of non-packaging and commercial waste, data quality should be improved. In addition, the information on recovery volumes and losses from waste treatment is often insufficient and limited.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
1.1 Ziel und Forschungsfragen der Arbeit	10
1.2 Begriffsdefinitionen.....	10
2. Stand des Wissens.....	12
2.1 Anwendungsbereiche von Eisen und Stahl.....	12
2.2 Verpackungen und Haushaltsgüter aus Eisenmetall.....	13
2.3 Rechtliche Grundlagen.....	15
2.4 Siedlungs- und Verpackungsabfälle in Österreich	17
2.5 Recyclingraten von Eisenmetallen in anderen Ländern	19
2.6 Sammlung von Altmetallen in Österreich	21
2.7 Restmüllzusammensetzung	22
2.8 Abfallbehandlung in Österreich	25
2.9 Stahlerzeugung.....	30
3. Material und Methode.....	31
3.1 Materialflussanalyse (gemäß ÖNORM S2096)	31
3.2 Datensammlung und Systembeschreibung.....	33
3.3 Datencharakterisierung und Unsicherheiten	33
3.4 Abfallaufkommen	36
3.4.1 Sammlung von Altmetallen	36
3.4.2 Gemischter Siedlungsabfall.....	36
3.4.3 Sperrmüll	38
3.4.4 Littering	39
3.5 Abfallbehandlung	39
3.5.1 Mechanische Aufbereitung	40
3.5.2 Thermische Behandlung und Schlackenaufbereitung.....	42
3.5.3 Recycling der Eisenmetalle	43
4. Ergebnisse und Diskussion	45
4.1 Abschätzung des Abfallaufkommens und der Rückgewinnung von Eisenmetallen aus Haushaltswaren und Verpackungen aus Siedlungsabfällen	45
4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	47
4.2.1 Partitionierung der Materialflüsse nach Behandlungsprozessen	47
4.2.2 Unsicherheiten und Datenlücken.....	51
5. Schlussfolgerungen.....	54
6. Ausblick und Empfehlungen	55
Literaturverzeichnis	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eisen und Stahl nach Anwendungsbereichen (Allwood et al., 2012)....	12
Abbildung 2: Beispiele Fe- Verpackungen (IUT & SDAG, 2014).....	14
Abbildung 3: Beispiele Fe-Nicht-Verpackungen (IUT & SDAG, 2014).....	15
Abbildung 4: Recyclingraten in Europa, 2015 (EUROSTAT, 2017).....	16
Abbildung 5: Recyclingraten für metallische Verpackungs- und Siedlungsabfälle in Österreich in %, 2005-2015 (EUROSTAT, 2017).....	19
Abbildung 6: Recyclingraten für Verpackungen aus Metall in den Mitgliedstaaten der EU, 2015 (nach EUROSTAT (2017))	20
Abbildung 7: Recyclingraten für Verpackungen aus Eisenmetall in den Mitgliedstaaten der EU (mit entsprechender Datenaufzeichnung), 2015 (nach EUROSTAT (2017))	20
Abbildung 8: Gemischter Siedlungsabfall nach Fraktionen (in %), Österreich 2014 (BAWP, 2018)	23
Abbildung 9: Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen und deren Behandlungsverfahren (BAWP, 2018)	25
Abbildung 10: Verfahrensschema einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (Lechner & Huber-Humer, 2010).....	26
Abbildung 11: Schema einer thermischen Abfallbehandlung (Wien Energie, 2018)..	27
Abbildung 12: Schlacke vor der Aufbereitung (Warrings, 2017).....	27
Abbildung 13: große Fe-Metalle nach der Schlackenaufbereitung (Warrings, 2017)	28
Abbildung 14: Förderband mit Fe-Metallen (Warrings, 2017).....	28
Abbildung 15: Schlacken für die Deponie (Warrings, 2017)	29
Abbildung 16: kleine Fe-Metalle nach der Schlackenaufbereitung (Warrings, 2017)	29
Abbildung 17: Verfahrensrouten zur Stahlerzeugung im Hochofen und Elektrolichtbogenofen (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018).....	30
Abbildung 18: MFA Modell, Bilanz der Eisenmetalle aus Haushaltsgütern	32
Abbildung 19: Rückgewinnung und Verluste von Eisenmetallen (in t) aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015.....	45
Abbildung 20: Recycling von Eisenmetallen nach Art der Rückgewinnung, Österreich 2015	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 21: Ergebnisse MFA von aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle aus Eisenmetall, Österreich 2015 (ohne EAGS) ...	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verpackungsaufkommen nach Fraktionen, Österreich 2014 (BAWP, 2018)	13
Tabelle 2: Beispiele für Verpackungen und Nichtverpackungen aus Eisenmetall (ARGE Hauer et al., 2016)	14

Tabelle 3: Behandlung und Verwertung von Siedlungsabfällen in Österreich 2015 (nach EUROSTAT (2017))	18
Tabelle 4: Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen (ohne biogene Abfälle aus dem Grünflächenbereich), Österreich 2015 (BAWP, 2018)21	
Tabelle 5: Restmüll- Sortieranalysen , Österreich 2010-2015	24
Tabelle 7: Nach Laner et al. (2016) ermittelte Unsicherheiten. Indikatoren zur Datenqualität und Sensitivitätsstufen gelten für Materialflüsse	34
Tabelle 8: Definition der Qualität der Indikatoren und qualitative Bewertung der Kriterien zur Datenbewertung (modifiziert auf Basis von Laner et al. (2016))	35
Tabelle 9: Metallanteile im Restmüll, Österreich 2015	37
Tabelle 10: Eisenmetalle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen aus Siedlungsabfällen in Österreich, 2015. Berechnungsgrundlage für das Abfallaufkommen	38
Tabelle 11: Zurückgewonnene Metalle aus MBA und MA, Österreich 2015	41
Tabelle 12: Metallrückgewinnung aus Schlackenaufbereitung der Müllverbrennungsanlagen	42
Tabelle 13: Massenströme von Abfallaufkommen und Abfallbehandlung für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015.....	46
Tabelle 14: Materialflüsse und Prozesse mit Unsicherheiten für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015.....	49
Tabelle 15: Unsicherheiten. Berechnungen der einzelnen Materialflüsse	52
Tabelle 16: Aus der vorliegenden Arbeit abgeleitete Maßnahmen zur Verbesserung der Rückgewinnung von Eisenmetallen und Verbesserung der Datenqualität...	58

Abkürzungsverzeichnis

AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BA	Schlacke (engl. <i>bottom ash</i>)
BAWP	Bundesabfallwirtschaftsplan
CV	Variationskoeffizient (engl. <i>coefficient of variation, CV</i>)
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EBS	Ersatzbrennstoff
EU	Europäische Union
EUROSTAT	Statistisches Amt der Europäischen Union
EW	Einwohner
Fe	Eisen
kg	Kilogramm
lt.	laut
MA	Mechanische Behandlung
MBA	Mechanisch-biologische Behandlung
MFA	Materialflussanalyse
Mio.	Millionen
MVA	Müllverbrennungsanlage
NVP	Nichtverpackungen
NE	Nicht-Eisen-Metalle
t	Tonne
vgl.	vergleiche
VP	Verpackungen
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

Die Weltbevölkerung wächst beständig und damit ihre Nachfrage nach Waren aller Art. Dadurch steigt auch der Bedarf an Rohstoffen zur Produktion von Gütern. In Österreich werden pro Jahr 187 Mio. t Material (60 kg pro Person und Tag) verbraucht, wovon ca. 5% Metalle sind (Schaffartzik et al., 2015).

Metalle sind ein häufig verwendetes Material für den Fahrzeugbau oder das Bauwesen, aber auch für Verpackungen und Konsumgüter. Ihre hervorragenden mechanischen und chemischen Eigenschaften, wie Beständigkeit und Schadenstoleranz, Verformbarkeit und Duktilität oder glänzende Oberflächen machen sie zu einem wertvollen Rohstoff (Gottstein, 2014).

Da Österreich über keine großen Metallagerstätten verfügt, muss ein Großteil der Metalle importiert werden, vor allem Eisen und Stahl (86%). Dabei haben sich die Preise für Eisenerz in den letzten 15 Jahren mehr als verdoppelt (Meyer et al., 2016). Die Stahlproduktion stieg weltweit in den letzten 30 Jahren um 220%, wobei nur 26% an Sekundärrohstoffen eingesetzt wurden (EPOC, 2017).

Bei eisenhaltigen Metallen kann die Substitution von Primäreisen durch Alteisen (Schrott) eine Energieeinsparung von rund 20% bedeuten. Zudem sinken die Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Schrott um 20-84% je Tonne erzeugtem Rohstahl, je nachdem, ob Sekundärmaterial im Hochofenprozess oder im Elektrostahlverfahren eingesetzt wird (Frischenschlager et al., 2010).

In Österreich wurden 2014 7,9 Mio. t Rohstahl produziert, wobei der Anteil des eingesetzten Metallschrotts ca. 32% betrug. Die Eisen- und Stahlindustrie ist ein wichtiger Wirtschaftsfaktor Österreichs mit ca. 15.000 Beschäftigten und einer Bruttowertschöpfung von ca. 1,6 Mrd. € pro Jahr (Meyer et al., 2016).

Eine Rückgewinnung von Eisenmetallen erscheint aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll und ist im Rahmen der Gesetzgebung auch vorgeschrieben. In der Verpackungsverordnung (2014) ist eine Recyclingrate von 50% für Verpackungen aus Metall und gemäß der Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle ab 2025 eine Recyclingrate von 70% für Verpackungen aus Eisenmetall (Abl. L 150, 2018) vorgeschrieben. Die Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) bestimmt, dass ab 2020 mindestens 70% der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle (ohne spezifische Ausweisung für einzelne Materialien wie Metalle) und mindestens 50% der Siedlungsabfälle und der Abfallmaterialien wie Papier, Metall, Kunststoff und Glas zur Wiederverwendung vorbereitet oder recycelt werden müssen (EC, 2008), wobei der Anteil durch die Abänderung der Richtlinie 2008/98/EG im Rahmen des Circular Economy Pakets der EU auf 55% (ab 2025) bzw. auf 65% (ab 2035) erhöht werden soll (Abl. L 150, 2018).

In der vorliegenden Arbeit wird näher untersucht, wie hoch das Aufkommen der aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle aus Eisenmetall in Österreich ist und wieviel davon zurückgewonnen wird und als sekundäres Eisenmetall zur Verfügung steht. Zudem soll untersucht werden, wie hoch das Potential einer wertstofflichen Verwertung von Eisenmetallen aus Siedlungsabfällen ist und welche Maßnahmen gesetzt werden könnten, um das Potential ausschöpfen und die Verwertungsquoten erhöhen zu können. Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) werden in den Abfallbilanzen separat ausgewiesen und Eisenmetalle aus EAG sind

daher nicht Teil der Untersuchung, ebenso wie Eisenmetalle aus Gebäuden oder Fahrzeugen, die in den statistischen Erhebungen den Bau- und Abbruchabfällen, bzw. Altfahrzeugen zugerechnet werden. Eisenmetalle wurden deshalb gewählt, da bereits Studien zu Aluminium (Warrings & Fellner, 2018) und Kunststoffverpackungen (Van Eygen et al., 2017) in Österreich vorliegen, es aber noch keine vergleichbaren Arbeiten zu Eisenmetallen gibt.

1.1 Ziel und Forschungsfragen der Arbeit

In der gegenständlichen Arbeit soll untersucht werden, wie hoch die Rückgewinnungsraten für Verpackungen (VP) und andere Haushaltsgüter (ausgenommen Elektro- und Elektronikgeräte) aus Eisenmetallen (Fe) zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind. Daher soll eine Massenbilanz für Eisenmetalle in Siedlungsabfällen erstellt und auf Basis dessen die stofflichen Verwertungs- bzw. Recyclingraten abgeleitet werden. Dabei sollen folgende Fragen erörtert werden:

- Wie hoch ist das Abfallaufkommen an Verpackungen aus Eisenmetall aus Haushalten in Österreich?
- Wie hoch ist die jährliche Abfallmenge an Haushaltsgütern aus Eisenmetall?
- Wie viele eisenmetallhaltige Verpackungen und Haushaltsgüter werden aus der separate Sammlung und Sortierung dem Recycling zugeführt?
- Wie hoch ist die Rückgewinnung aus der Abfallbehandlung und -aufbereitung (Schlackenaufbereitung und mechanische Behandlung)?
- Welche Maßnahmen könnten gesetzt werden, um die Verwertungsquoten von Fe-haltigen VP in Österreich zu erhöhen?

Die Beantwortung der Fragen soll Aufschluss darüber geben, wo und in welcher Höhe Verluste auftreten. Eine Evaluierung der Verluste könnte aufzeigen, ob und in welcher Form sich Verbesserungen bei der Sammlung, Sortierung und Abfallaufbereitung realisieren ließen.

Ziel der Arbeit ist es, neben der Erhebung von Recyclingquoten, auch eine Abschätzung des Potentials an nicht zurückgewonnenem Eisenmetall aus Verpackungen und Haushaltsgüter aus Siedlungsabfällen pro Jahr vornehmen zu können.

1.2 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend sollen in der Abfallwirtschaft häufig verwendete Begriffe und verschiedene Abfallarten erläutert werden.

Das Abfallaufkommen in Österreich setzt sich laut BAWP (2018) aus Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen, Aushubmaterialien, Abfällen aus dem Bauwesen, Sekundärabfällen und übrigen Abfällen zusammen.

Siedlungsabfälle sind laut AWG (2002) „Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind“ und „setzen sich aus den Fraktionen gemischter Siedlungsabfall (Restmüll), Sperrmüll, biogene Abfälle, Problemstoffe, Elektroaltgeräte, Altbatterien und Altstoffe wie Verpackungen, Altpapier, Glas, Metalle, Kunststoffe, Textilien usw. zusammen“.

Gemischte Siedlungsabfälle sind dabei der Teil der nicht-gefährlichen Siedlungsabfälle, die weder den Altstoffen noch den biogenen oder sperrigen Siedlungsabfällen oder dem Straßenkehricht zuzuordnen ist. Sie werden auch als Restmüll bezeichnet.

Sperrmüll sind Abfälle, „die aufgrund ihrer Größe oder Form nicht über die ortsüblichen Abfallbehälter gesammelt und keiner Altstoffsammlung zugeordnet werden können. [...] Aussortierte Altmetalle aus dem Sperrmüll gelangen in Anlagen zum Recycling“ (BAWP, 2018).

Altstoffe sind laut AWG (2002) getrennt gesammelte Abfälle oder aus einer Abfallbehandlung gewonnene Stoffe, die einer Verwertung zugeführt werden.

In Österreich werden die Altstoffe durch Abholung oder Abgabe (Sammelinseln) und Entgegennahme, beispielsweise an einem Mistplatz, gesammelt. Aus den gesammelten Mengen ergeben sich dann die Sammel- und nach weiteren Aufbereitungs-/Behandlungsschritten die Verwertungsraten (auch Sammel- und Verwertungsquoten genannt). Die Sammelquote ist die gesammelte Menge an Rohstoffen im Verhältnis zur Grundgesamtheit, also beispielsweise die gesammelte Menge an Altkunststoffen im Verhältnis zu der in Verkehr gebrachten Menge an Kunststoffen.

Bei einer Verwertung wird zwischen einer stofflichen und energetischen Verwertung und der Vorbereitung zur Wiederverwendung des Abfalls unterschieden. Letzteres ist beispielsweise die Reparatur oder Reinigung eines Gegenstandes, der zu Abfall geworden ist und der ohne weitere Behandlung wiederverwendet werden kann. Bei der energetischen Verwertung handelt es sich um die Nutzung der brennbaren Anteile des Abfalls zur Reduzierung der Abfallmenge, bzw. zur Energiegewinnung durch Verbrennung. Dagegen werden bei der stofflichen Nutzung von Abfall, auch (Material-)Recycling genannt, Materialien oder Stoffe, also etwa Metalle oder Glas, für den ursprünglichen oder für andere Zwecke aufbereitet. Sie sollen der Substitution von Primärrohstoffen dienen. Zum Recycling zählen auch organische Abfälle, die etwa als Hausmüll oder in der Gastronomie anfallen und die biologisch abbaubar sind (AWG, 2002) und Metalle, die nach der Verbrennung von Siedlungsabfällen aus den Verbrennungsrückständen zurückgewonnen werden (Abl. L 150, 2018).

Eine Verwertungsrate bezieht sich auf die energetische und stoffliche Verwertung von Rohstoffen im Verhältnis zur Grundgesamtheit, während eine Recyclingrate nur den Anteil einer stofflichen Verwertung wiedergibt.

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit, wenn es um die stoffliche Verwertung von Materialien geht, ausschließlich der Begriff Recycling oder recycelt

und damit synonym für die Begriffe stoffliche Verwertung, Vorbereitung zur Wiederverwendung oder Rückgewinnung verwendet.

2. Stand des Wissens

2.1 Anwendungsbereiche von Eisen und Stahl

Eisen und Stahl machen mehr als 90% des weltweit produzierten Metalls aus (Baker et al., 2018) und werden in vielen Bereichen eingesetzt. Die vielfachen Einsatzmöglichkeiten beruhen unter anderem auf den unterschiedlichen Eigenschaften, die sich durch Legieren und Verarbeiten einstellen lassen. Eisenwerkstoffe mit einem Massenanteil von bis zu 2% an Kohlenstoff werden als Stahl bezeichnet, bei einem Anteil von mehr als 2% als Gusseisen. Da Stahl im Gegensatz zu Gusseisen plastisch verform- und schmiedbar ist, kann es vielfältiger eingesetzt werden (Berns & Theisen, 2008). Die Anwendung von Metallen in Produkten wird in der Literatur meist nach vier Sektoren vorgenommen (Allwood et al., 2012):

- Bauwesen (Gebäude und Infrastruktur)
- Transport (Kraftfahrzeuge und sonstige Fahrzeuge)
- Maschinenbau (Maschinen und Geräte, Motoren und Generatoren)
- Metallwaren (Verpackungen, Haushaltsgüter, sonstige Metallwaren)

Dabei wird Eisen und Stahl vor allem im Bauwesen (56%) eingesetzt, während rund 16% in Metallwaren verarbeitet werden, wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist. Insgesamt gehen ca. 1% des eingesetzten Stahls in Verpackungen und 3% in Haushaltsgüter (Allwood et al., 2012).

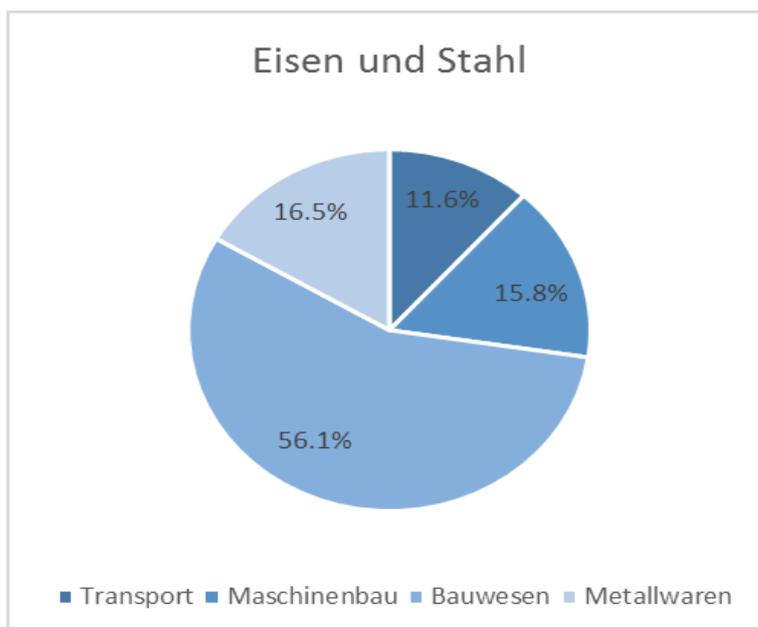


Abbildung 1. Eisen und Stahl nach Anwendungsbereichen (Allwood et al., 2012)

Die in den unterschiedlichsten Produkten und Anwendungen eingesetzten Eisenmetalle können nach deren Nutzungsende gesammelt und wiederverwendet bzw. recycelt werden. Mengenmäßig sind die in Gebäuden oder Fahrzeugen eingesetzten Eisenmetalle relevant, sie sind allerdings aufgrund ihrer hohen Nutzungsdauer (Gebäude ca. 80 Jahre, Kraftfahrzeuge ca. 14 Jahre) (Cooper & Allwood, 2012; Kalusche, 2004) nicht kurzfristig verfügbar. Sie werden in den statistischen Erhebungen den Bau- und Abbruchabfällen bzw. Altfahrzeugen zugerechnet und sind ebenso wie die Elektroaltgeräte (EAG) nicht Teil der vorliegenden Untersuchung.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit für alle Anwendungen, die auf dem Werkstoff Eisen basieren, ausschließlich der Begriff Eisenmetalle verwendet.

2.2 Verpackungen und Haushaltsgüter aus Eisenmetall

Der Anteil von Eisenmetallen in Verpackungen und Haushaltsgütern ist, bezogen auf den Gesamteinsatz an Eisenmetallen in Produkten und Anwendungen, gering. In Österreich fallen pro Jahr ca. 1,3 Mio. t Verpackungsabfälle an, was 30% der Siedlungsabfälle entspricht (BAWP, 2018), während die Verpackungsindustrie nur etwa 1% zum Bruttoinlandsprodukt beiträgt (PROPAK, 2017). Der Anteil an Verpackungen aus Metall in Österreich beträgt ca. 56.000 t pro Jahr, wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist. Verpackungen sind allgemein sehr kurzlebige Produkte mit einer Lebensdauer von unter einem Jahr (Geyer et al., 2017), was eine kontinuierliche Reproduktion von Verpackungsgütern und damit einen hohen Ressourceneinsatz erfordert.

Tabelle 1: Verpackungsaufkommen nach Fraktionen, Österreich 2014 (BAWP, 2018)

Packstoff	Aufkommen	
	[t, gerundet]	%
Papier, Pappe und Kartonagen	542.000	41,6%
Glas	273.000	20,9%
Metall	56.000	4,3%
Kunststoff	292.000	22,4%
Holz	93.000	7,1%
Sonstige	47.000	3,6%
Gesamt	1.304.000	

Neben den Verpackungen aus Metall werden weitere metallische Abfälle über den Siedlungsabfall entsorgt. Dieser Haushaltsschrott entsteht aus in Haushalten und ähnlichen Einrichtungen genutzten Haushaltsgütern, die nicht der Verpackungsverordnung (2014) und der Elektroaltgeräteverordnung (2005) unterliegen. In Tabelle 2, Abbildung 3 und Abbildung 2 sind Beispiele für Verpackungen und Haushaltsschrott aus Eisenmetallen, die bei Abfallsortieranalysen als Nichtverpackungen (NVP) kategorisiert werden, aufgeführt. Anzumerken ist noch, dass eine Verpackung aus Eisenmetall zu mindestens 80% aus dem Monopackstoff Eisenmetall bestehen muss, da sie ansonsten als Materialverbund gilt, der aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Packstoffen besteht (ARA, 2015). Beispiele für metallhaltige Materialverbunde sind Papphülsen oder Pappdosen mit Metallboden und/oder -deckel oder Blister Verpackungen für Medikamente.

Tabelle 2: Beispiele für Verpackungen und Nichtverpackungen aus Eisenmetall (ARGE Hauer et al., 2016)

Fe Getränke VP	Weißblechgetränkedosen, Verschlüsse
Fe sonstige VP	Konservendosen für Fleisch- und Fischwaren, Aufstriche, Obst, Gemüse, Fertignahrung, Medikamente, Tierfutter, Weithalsverschlüsse, Kronenkorken, (soweit kein Verbundstoff), Deckel, Stahlbänder, Kanister, Drahtkörbe
Fe NVP	Nägel, Schrauben, Beschläge, Bleche, Rohre, Schlösser, Werkzeug, Kfz-Teile, Drähte (z.B. Kleiderbügel, Schweißdraht, Gitter), Haushaltswaren (z.B. Kochgeschirr, Kerzenständer, Taschenlampen, Griffe, Rasierklingen), Ringe, Bürowaren (z.B. Locher, Hefter), Felgen



Abbildung 2: Beispiele Fe- Verpackungen (IUT & SDAG, 2014)



Abbildung 3: Beispiele Fe-Nicht-Verpackungen (IUT & SDAG, 2014)

2.3 Rechtliche Grundlagen

Der rechtliche Rahmen der Abfallwirtschaft für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union wurde durch die EU Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG festgelegt (EC, 2008) und in Österreich durch das AWG (2002) umgesetzt, Ziele und Strategien werden im BAWP (2018) veranschaulicht. Dabei sind die vorrangigen Ziele der Abfallwirtschaft im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit die Vermeidung von schädlichen oder nachteiligen Einwirkungen auf Mensch und Natur sowie die Schonung von Ressourcen. Zum Umgang mit Abfällen wurde eine 5-stufige Hierarchie festgelegt, wobei gemäß der Abfallrahmenrichtlinie „diejenigen Optionen zu fördern [sind], die insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen“ (BAWP, 2018):

1. Abfallvermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung
5. Beseitigung

Die Europäische Union hat mit dem “EU Action Plan for the Circular Economy” eine Initiative zur stärkeren Wiederverwendung (engl. *re-use*) und Recycling von Produktions- und Konsumgütern lanciert (EC, 2014), um den Ressourcenverbrauch von Rohstoffen und die mit dem Abbau und der Entsorgung einhergehenden Umweltbelastungen zu reduzieren. So konnten die Recyclingraten (inklusive Kompostierung) in der EU für Siedlungsabfälle in den letzten 15 Jahren von 25% auf 45% (2015) gesteigert werden und gleichzeitig wurden nur noch 26% der

Siedlungsabfälle (2000: 55%) direkt deponiert (1. Behandlungsschritt). Allerdings sind die Raten in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU sehr unterschiedlich. So werden z.B. in der Slowakei oder Rumänien weniger als 15% recycelt (Abbildung 4) und in Kroatien oder Griechenland immer noch mehr als 4/5 aller Siedlungsabfälle auf Deponien entsorgt (EUROSTAT, 2017).

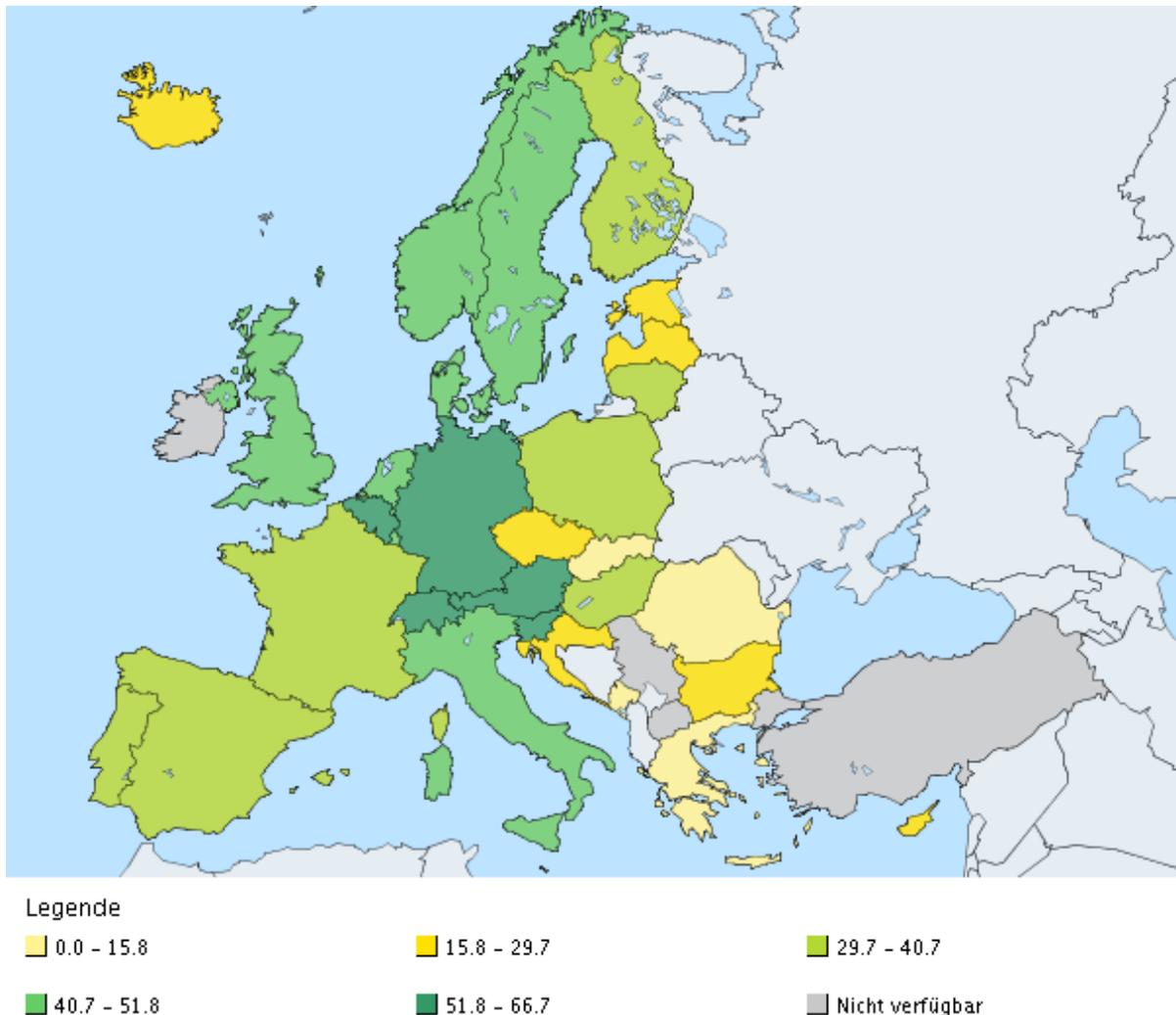


Abbildung 4: Recyclingraten in Europa, 2015 (EUROSTAT, 2017)

Das Konzept der Circular Economy, bzw. Kreislaufwirtschaft, welches die Europäische Union verfolgt, stellt statt einer linearen Nutzung (nehmen, herstellen, verbrauchen, entsorgen) ein integratives System zur Einsparung von Ressourcen dar, in dem die verwendeten Rohstoffe effizient eingesetzt werden und möglichst lange erhalten bleiben. Genutzte Rohstoffe sollen wieder in Produktionsprozesse zurückgeführt werden, so dass letztendlich keine Abfälle mehr entstehen (EC, 2014; Lutter et al., 2016).

Laut EU- Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) müssen bis 2020 mindestens 50% der „Abfallmaterialien wie- zumindest- Papier, Metall, Kunststoff und Glas aus Haushalten und gegebenenfalls aus anderen Quellen, soweit die betreffenden Abfallströme

Haushaltsabfällen ähnlich sind“ zur Wiederverwendung vorbereitet oder recycelt werden. Der Anteil wird durch die Abänderung der Richtlinie 2008/98/EG im Rahmen des Circular Economy Pakets der EU auf 55% (ab 2025), bzw. auf 65% (ab 2035) erhöht (Abl. L 150, 2018). Dabei wird auch die Berechnungsmethode vereinheitlicht. Bisher waren vier unterschiedliche Berechnungsmethoden möglich:

- Methode 1: recycelte Menge von den Altstoffen Papier, Metall, Kunststoff und Glas bezogen auf die in Haushalten erzeugten Mengen
- Methode 2: recycelte Menge von den Altstoffen Papier, Metall, Kunststoff und Glas und anderer sortenreiner Abfallströme bezogen auf die in Haushalten oder ähnlichen Abfallströmen erzeugten Mengen
- Methode 3: recycelte Menge von Haushaltsabfällen bezogen auf die in Haushalten erzeugten Abfällen
- Methode 4: recycelte Menge von Siedlungsabfällen bezogen auf die erzeugten Mengen an Siedlungsabfällen

Zukünftig kommt nur noch die Methode 4 zur Anwendung, in der die erzeugten und recycelten Mengen an Siedlungsabfällen berechnet werden. Dabei wurde auch der Begriff Siedlungsabfälle präzisiert. Siedlungsabfälle schließen demnach neben Abfällen aus Haushalten und anderen Herkunftsbereichen (Einzelhandel, der Verwaltung, dem Bildungsbereich, den Gesundheitsdiensten, Unterbringungs- und Verpflegungsdiensten) auch Abfälle aus „anderen Dienstleistungen und Tätigkeiten, deren Abfälle in Bezug auf Beschaffenheit und Zusammensetzung Abfällen aus Haushalten ähnlich sind“, ein. Darunter fallen „Abfälle aus der Pflege von Parks und Gärten wie Laub, Gras und Baumschnitt sowie Markt- und Straßenreinigungsabfälle wie [der] Inhalt von Abfallbehältern und Straßenkehricht, nicht jedoch Materialien wie Sand, Gestein, Schlamm oder Staub“ (Abl. L 150, 2018).

Laut Verpackungsverordnung (2014) ist eine Recyclingrate von 50% für Verpackungen aus Metall verpflichtend, wobei keine separate Ausweisung nach Metallarten notwendig ist. Diese erfolgt aber mit Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Ab Ende 2025 ist eine Recyclingrate von 70% für Verpackungen aus Eisenmetall (80% bis Ende 2030) vorgeschrieben (Abl. L 150, 2018).

2.4 Siedlungs- und Verpackungsabfälle in Österreich

In Österreich fielen im Jahr 2015 4,2 Mio. t Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen und rd. 675.000 t sonstige Siedlungsabfälle (biogene Abfälle aus dem Grünflächenbereich, Küchen- und Speiseabfälle und Straßenkehricht) an (BAWP, 2018). Von den 4,8 Mio. t Siedlungsabfällen wurden 3,8 Mio. t recycelt (davon 1,5 Mio. t kompostiert) (Tabelle 3). Demnach werden in Österreich 56,9% der Siedlungsabfälle recycelt und die ab 2020 vorgeschriebene Recyclingrate für Siedlungsabfälle von 50% wird bereits erfüllt. Die in EUROSTAT erfassten Daten werden dabei nach der Methode 4 berechnet (EUROSTAT, 2017).

Tabelle 3: Behandlung und Verwertung von Siedlungsabfällen in Österreich 2015 (nach EUROSTAT (2017))

Siedlungsabfälle (2015)	Massen [t, gerundet]
Abfallaufkommen	4.836.000
Behandelte Abfallmenge	4.728.000
Deponie	144.000
Verbrennung	1.833.000
Energetische Rückgewinnung aus der Verbrennung	1.833.000
Recycling	1.241.000
Kompostierung	1.511.000
	Anteil [%]
Deponie	3,0%
Verbrennung	37,9%
Recycling	25,7%
Kompostierung	31,2%
Total	97,8%

In Österreich (2015) wurden 56.800 t Verpackungen aus Metall aus Haushalten, Gewerbe und Industrie als Abfall erzeugt, wovon 49.600 t oder 87,2% der metallischen Verpackungsabfälle recycelt werden (EUROSTAT, 2017). Recyclingraten von Verpackungen aus Metall müssen erst ab 2025 nach Eisenmetallen und Aluminium differenziert werden und werden in Österreich gegenwärtig nicht separat ausgewiesen. Gemäß der Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle ist ab Ende 2025 eine Recyclingrate von 70% und ab Ende 2030 von 80% für Verpackungen aus Eisenmetall vorgeschrieben (Abl. L 150, 2018). Die Recyclingraten für metallische Verpackungsabfälle und für Siedlungsabfälle in Österreich von 2005 bis 2015 sind aus Abbildung 5 ersichtlich.

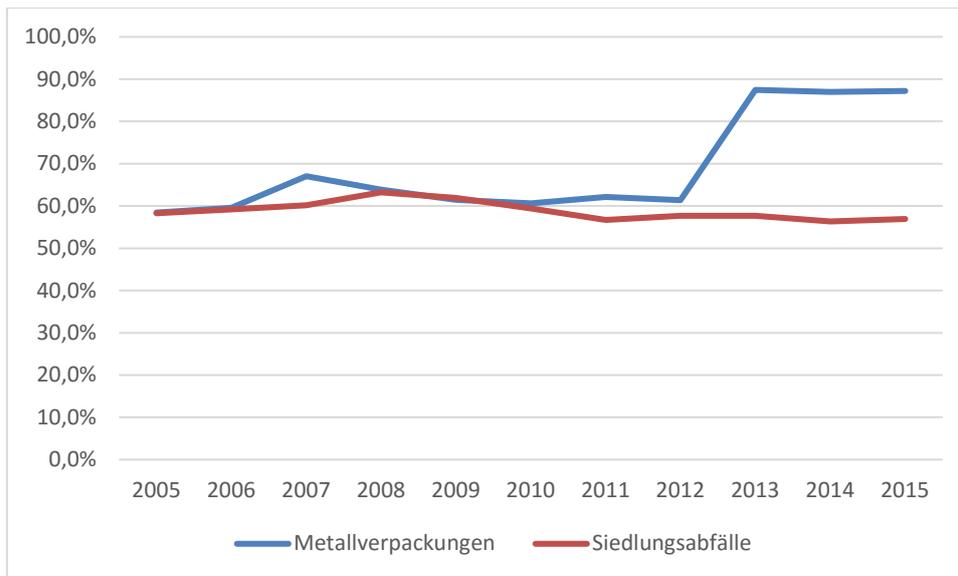


Abbildung 5: Recyclingraten für metallische Verpackungs- und Siedlungsabfälle in Österreich in %, 2005-2015 (EUROSTAT, 2017)

2.5 Recyclingraten von Eisenmetallen in anderen Ländern

Reck et al. (2010) haben die Recyclingraten in 51 Ländern für 2005 für Eisen und Stahl untersucht. Dabei ergab sich eine durchschnittliche Recyclingrate von 70% für alle Anwendungen und 95% bei Haushaltsgütern (inklusive EAGs) aus Eisen und Stahl. Graedel et al. (2011) haben die Recyclingraten von verschiedenen Metallen anhand einer Literaturrecherche verglichen und gehen anhand der gewonnenen Daten von Recyclingraten von 70-90% für Eisenmetalle aus, was Untersuchungen von Davis et al. (2007) zur Altmittel-Rückgewinnung in Großbritannien bestätigen. Diese Zahlen lassen allerdings keine unmittelbaren Rückschlüsse zur Rückgewinnung von Eisenmetallen aus Siedlungsabfällen zu, da sie sich auf alle Anwendungsbereiche für Eisenmetalle beziehen. Zudem ist anzumerken, dass besonders bei Kraftfahrzeugen (92%) und im Stahlkonstruktionsbau (88%) hohe Recyclingraten erzielt werden (Fenton, 2003). Da über 70% der Eisenmetalle im Transport und Bauwesen eingesetzt werden, beeinflusst eine Rückgewinnung aus diesen Sektoren das Gesamtergebnis wesentlich.

Die von den Mitgliedsstaaten der EU verpflichtenden Meldungen an EUROSTAT (2017) für Verpackungen aus Metall zeigen, dass die Recyclingraten innerhalb der EU stark variieren und im Durchschnitt bei 76% liegen (Abbildung 6). Eine separate Ausweisung von Verpackungen aus Eisenmetall, wie ab 2025 vorgeschrieben, führen derzeit nur wenige Länder in der EU durch. Die Recyclingraten von Verpackungen aus Eisenmetall liegen in diesen Ländern bei durchschnittlich 78% (Abbildung 7).

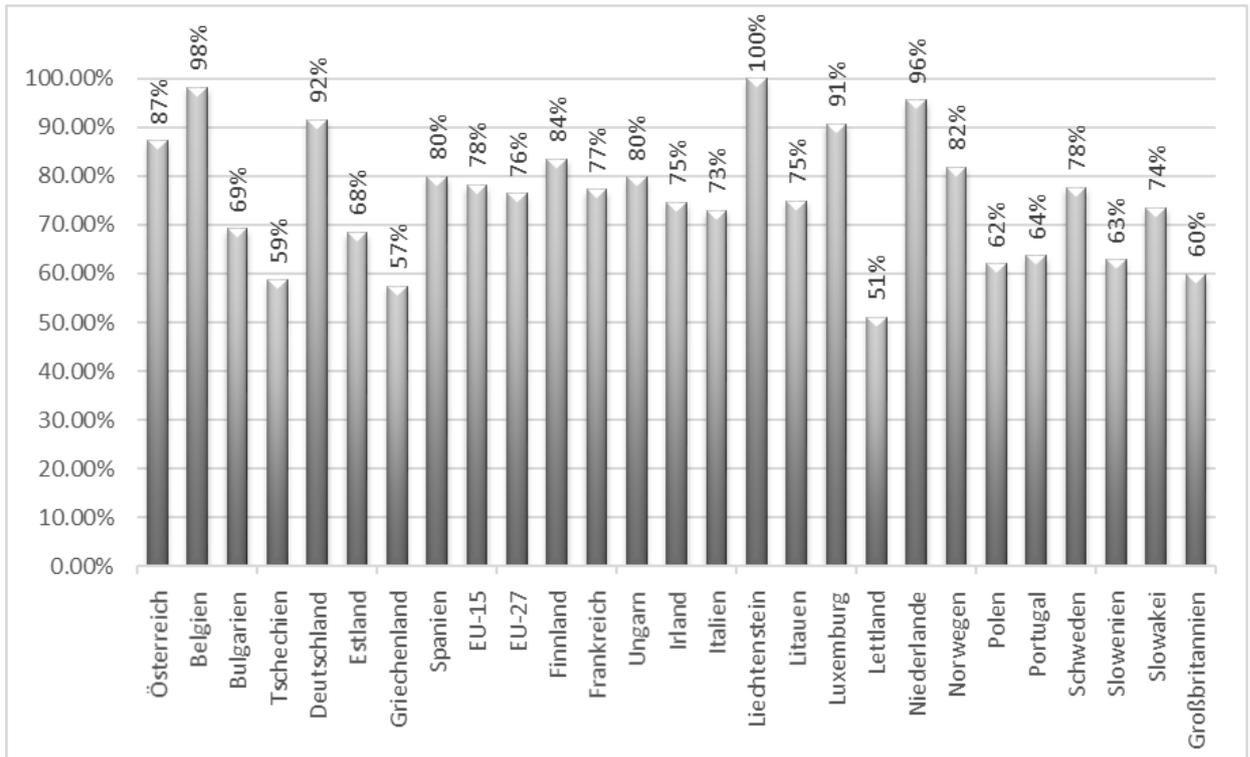


Abbildung 6: Recyclingraten für Verpackungen aus Metall in den Mitgliedstaaten der EU, 2015 (nach EUROSTAT (2017))

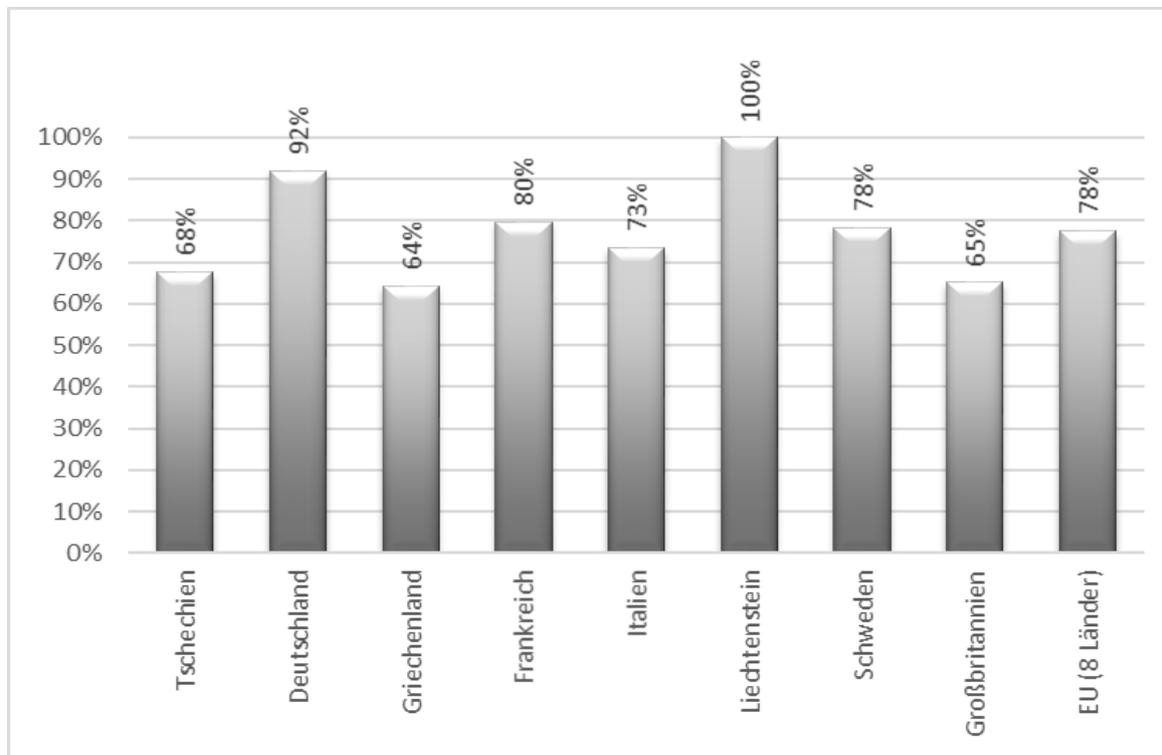


Abbildung 7: Recyclingraten für Verpackungen aus Eisenmetall in den Mitgliedstaaten der EU (mit entsprechender Datenaufzeichnung), 2015 (nach EUROSTAT (2017))

2.6 Sammlung von Altmetallen in Österreich

In Österreich gibt es für Verpackungen eine „erweiterte Produzentenverantwortung“, die laut AWG (2002) eine verpflichtende Rücknahme von Verpackungen für sogenannte Primärverpflichtete (Abpacker, Importeure, Eigenimporteure und Versandhändler sowie Hersteller und Importeure von Serviceverpackungen) vorsieht und die „hinsichtlich der von ihnen in Verkehr gesetzten Haushaltsverpackungen [...] an einem genehmigten Sammel- und Verwertungssystem für Haushaltsverpackungen teilzunehmen“ haben.

Die größten Sammel- und Verwertungssysteme für Haushaltsverpackungen in Österreich sind die Altstoff Recycling Austria (ARA), mit einem Marktanteil von 81% für Metalle, INTERSEROH (9%) und Reclay UFH (6%) (EDM, 2017). Dabei wurden im Jahr 2015 von der ARA (2017) 1,1 Mio. t Verpackungen aus Haushalten gesammelt, wovon rund 29.000 t Verpackungen aus Metall waren.

Tabelle 4: Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen (ohne biogene Abfälle aus dem Grünflächenbereich), Österreich 2015 (BAWP, 2018)

Abfallbezeichnungen	Massen [t, gerundet]	%
Gemischter Siedlungsabfall	1.432.000	34,4%
Sperrmüll	244.000	5,9%
Problemstoffe	19.000	0,5%
Elektro- und Elektronikaltgeräte	79.000	1,9%
Altpapier - Verpackungen / Drucksorten	660.000	15,9%
Altglas - Verpackungen	219.000	5,3%
Altmetalle - Verpackungen	29.000	0,7%
Altmetalle - Haushaltschrott (Sperrmüllsammlung)	88.000	2,1%
Altkunststoffe und Verbundmaterialien - Verpackungen	155.000	3,7%
Alttextilien	29.000	0,7%
Altholz - Verpackungen / Sperriges Holz	244.000	5,9%
Sonstige Altstoffe inkl. Verpackungen	27.000	0,6%
Biogene Abfälle	936.000	22,5%
Gesamt	4.160.000	

Zusätzlich zu den metallischen Verpackungen werden Altmetalle als Haushaltsschrott bei Altstoff-Sammelzentren, mittels Sammelbehälter (Metallcontainer) oder im Zuge von Sperrmüllaktionen gesammelt. Die Gesamtmenge der gesammelten Altmetalle betrug im Jahr 2015 117.000 t (Verpackungen und Haushaltsschrott), wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist.

Bei der Ausweisung der Sammelmengen wird zwischen Altmetallen aus Verpackungen und Haushaltsschrott unterschieden, aber keine Differenzierung nach Metallarten, wie Eisenmetall, Aluminium und sonstige Nicht-Eisen-Metalle (NE) vorgenommen. Daher sind auch keine spezifischen Abfallmengen bzw. Recyclingraten für Eisenmetalle verfügbar.

Die Altstoffe, die keiner getrennten Sammlung zugeführt werden, werden von den Haushalten über den Restmüll entsorgt. Der Restmüll und nicht-wertstoffhaltige Anteil des Sperrmülls wird in Österreich in Müllverbrennungsanlagen (MVA) thermisch verwertet oder mechanisch (MA) bzw. mechanisch-biologisch behandelt (MBA). Dabei kann der Sperrmüll noch Altstoffe enthalten, die bei der Sortierung nicht identifiziert bzw. erfasst wurden. Die aus der Schlackenaufbereitung der Müllverbrennung und aus der mechanischen Behandlung zurückgewonnenen Alt- oder Wertstoffe können zusammen mit den separat gesammelten Altstoffen dem Recycling zugeführt werden.

2.7 Restmüllzusammensetzung

Im BAWP (2018) wird die Zusammensetzung der gemischten Siedlungsabfälle nach Fraktionen ausgewiesen (Abbildung 8). Die vorliegende Zusammensetzung ist beispielhaft und beruht auf einer Sortieranalyse für Restmüll aus der Steiermark von 2014, da bisher keine einheitlichen, bundesweiten Sortieranalysen durchgeführt wurden.

Es wird aber derzeit zur Verbesserung der Datenlage eine bundesweit einheitliche Methodik zur Durchführung und Planung von Restmüll-Sortieranalysen erarbeitet, die ab 2018 angewendet werden soll (Happenhofer, 2017). Die Sortieranalysen der einzelnen Bundesländer wurden bisher mit unterschiedlichem Umfang und Zielsetzung durchgeführt, wodurch die Ergebnisse der verschiedenen Sortieranalysen in den einzelnen Bundesländern stark voneinander abweichen, wie Tabelle 5 zeigt. Meist wurden nur der Gesamtmetallgehalt und der Anteil der Verpackungen nach Materialart untersucht. Es fehlen daher genauere Angaben über den Anteil an Eisenmetallen im Restmüll, bzw. eine Differenzierung nach Verpackungen und Nichtverpackungen. Sortieranalysen zur Zusammensetzung von Sperrmüll in Österreich fehlen zur Gänze. Es gibt lediglich eine Studie zum Verpackungsaufkommen 2013 in Österreich, die auch eine Analyse zu Verpackungen im Sperrmüll vorgenommen hat (Hauer et al., 2015).

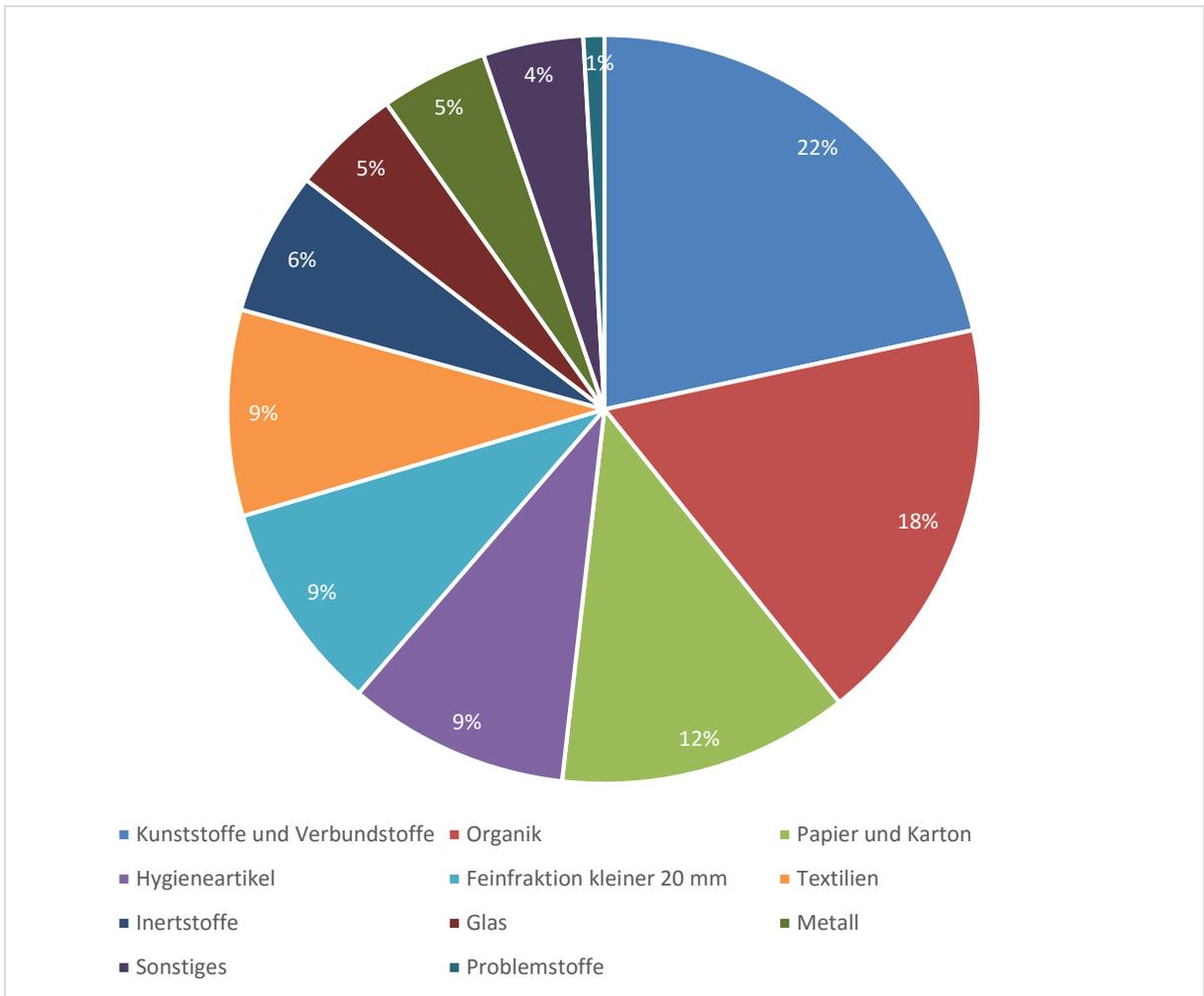


Abbildung 8: Gemischter Siedlungsabfall nach Fraktionen (in %), Österreich 2014 (BAWP, 2018)

Tabelle 5: Restmüll- Sortieranaysen , Österreich 2010-2015

	Wien 2015 ¹⁾	OÖ 2013 ²⁾	Salzburg 2012 ³⁾	Stmk. 2012/13 ⁴⁾	Kärnten 2011 ⁵⁾	NÖ 2010-11 ⁶⁾	Tirol 2010 ⁷⁾
Metalle Gesamt	3,01%	2,31%	4,10%	4,69%	4,00%	2,90%	
Metall-VP	1,69%	1,30%	2,20%	2,40%	2,40%	1,50%	1,80%
Metall-NVP	1,32%	1,01%	1,90%	2,29%	1,60%	1,40%	
Fe Gesamt	1,48%			2,46%			
Fe-VP	0,84%	0,64%		1,10%			
Fe-NVP	0,64%					0,80%	
Al Gesamt	1,44%						
Al-VP	0,85%						
Al-NVP	0,59%						
Sonstige Metalle Gesamt	0,09%						
Sonstige Metalle-VP	0,00%						
Sonstige Metalle-NVP	0,09%						
NE Gesamt	1,53%			2,23%			
NE-VP	0,85%	0,66%		1,30%			
NE-NVP	0,68%					0,60%	

1) Wiener Altstoff- und Restmüllanalysen 2015/16. Endbericht vom April 2016 (ARGE Hauer et al., 2016)

2) Restabfallanalyse Oberösterreich 2013 (ARGE Abfallanalyse Oberösterreich 2013, 2014)

3) Restmüllanalyse 2012 (Land Salzburg, 2013)

4) Sortieranaysen für Restmüll aus der Steiermark. Endbericht (IUT & SDAG, 2014)

5) Abfallwirtschaftskonzept des Landes Kärnten. 3. Fortschreibung 2012 (Amt der Kärntner Landesregierung (Ed.), 2012)

6) Niederösterreichische Restmüllanalyse und Detailanalyse der Feinfraktion 2010-2011 (Boku, 2011)

7) Restmüllanalysen Tirol 2010 In Amt der Tiroler Landesregierung (Hauer & FHA, 2010)

2.8 Abfallbehandlung in Österreich

Laut BAWP (2018) wurden 1,7 Mio. t gemischte Siedlungsabfälle und Sperrmüll thermisch (1,2 Mio. t) und mechanisch-biologisch (0,5 Mio. t) behandelt, wobei ca. 27.000 t Metalle aus der Schlackenaufbereitung nach der Müllverbrennung (Abbildung 9) und 7.200 t (1,6%) aus der mechanischen Behandlung zurückgewonnen wurden (Neubauer, 2017).

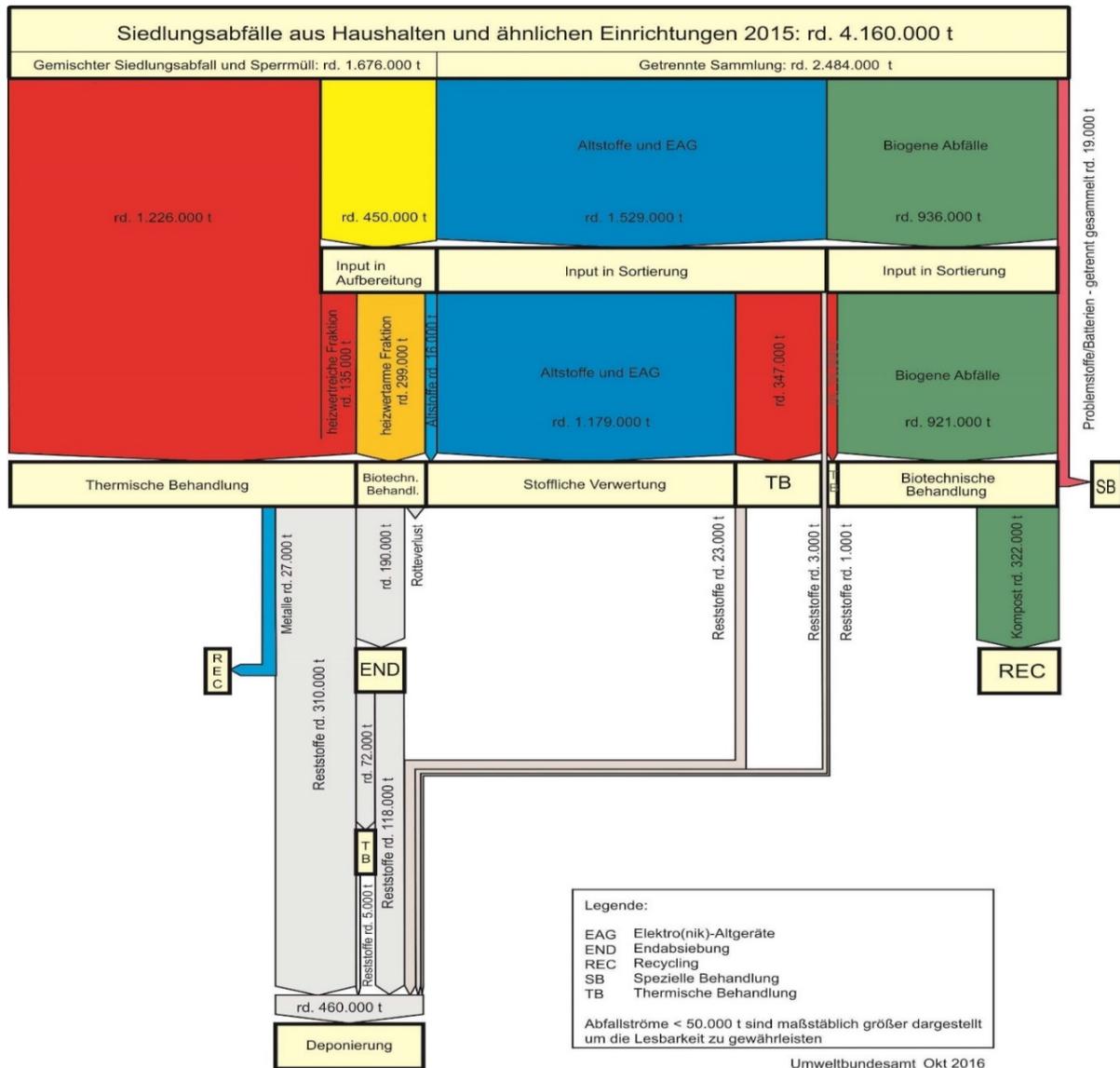


Abbildung 9: Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen und deren Behandlungsverfahren (BAWP, 2018)

In Österreich gibt es 14 MBAs für Siedlungsabfällen mit einer Kapazität von ca. 660.000 t (BMLFUW, 2017) und mehr als 20 Anlagen einer rein mechanischen Aufbereitung (MA) mit einer Kapazität von über 1,3 Mio. t (Neubauer & Öhlinger, 2008). In einer MBA werden die Siedlungsabfälle vor einer Deponierung bzw. einer weiteren thermischen Behandlung vorbehandelt. Dabei wird ein Teil der Abfallmenge als heizwertreiche Fraktion oder sogenannte Ersatzbrennstoffe (EBS) abgetrennt, bzw.

aufbereitet und in Müllverbrennungsanlagen, Kraftwerken oder in der Zementindustrie energetisch genutzt. Geringe Mengen an Wertstoffen, wie Metalle, werden größtenteils mittels Magnetabscheider abgeschieden und zurückgewonnen. Etwa 25% der Abfallmenge wird deponiert, die restliche Abfallmenge entweicht als Rotteverlust (aerober biologischer Abbauprozess) in Form von CO_2 oder Wasserdampf (UBA, 2018). Ein Verfahrensschema einer mechanisch-biologischen Behandlungsanlage zeigt Abbildung 10. In einer rein mechanischen Aufbereitungsanlage entfällt die Behandlung der biogenen Anteile.

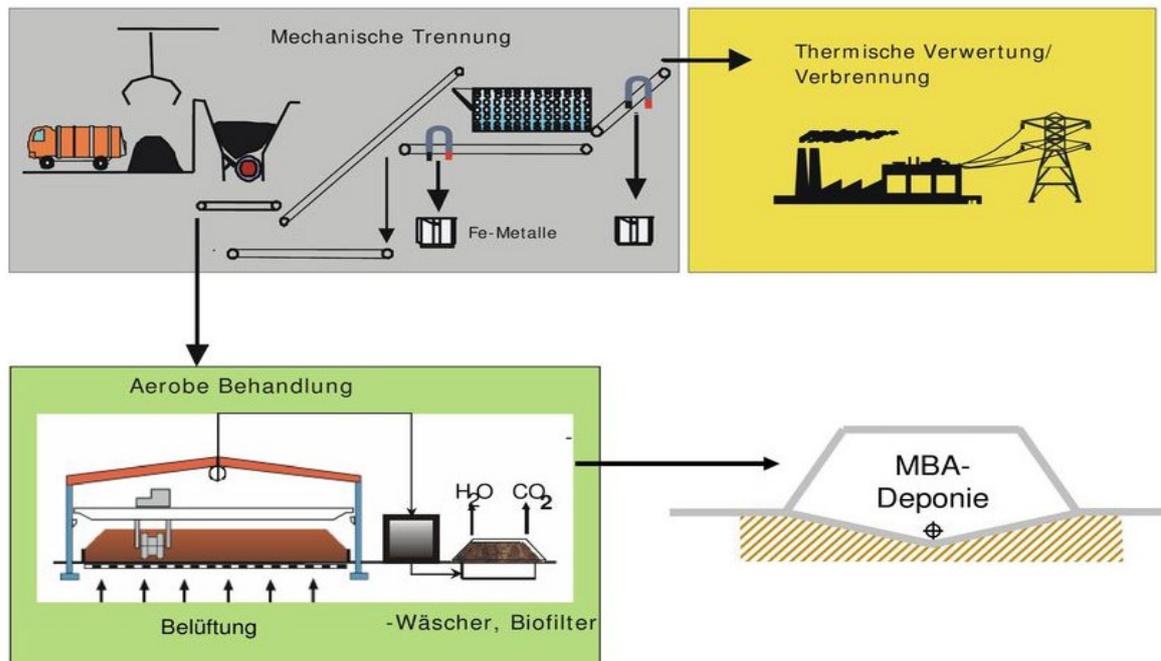


Abbildung 10: Verfahrensschema einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (Lechner & Huber-Humer, 2010)

In Österreich werden in 11 Müllverbrennungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von 2,5 Mio. t Siedlungsabfälle verbrannt (BAWP, 2018). Die Müllverbrennung dient zur Reduktion des Abfallvolumens und der Energiegewinnung sowie der Zerstörung und Ausscheidung der im Abfall vorhandenen Schadstoffe. Neben Siedlungsabfällen aus Rest- und Sperrmüll werden auch anaerob stabilisierter Schlamm (Faulschlamm), Rückstände aus der Altpapierverarbeitung sowie Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung verwertet. Die festen Verbrennungsrückstände (Schlacken), die etwa 20-25% des verbrannten Abfalls betragen, können anschließend aufbereitet werden und die darin enthaltenen Wertstoffe – vor allem Fe-haltige Fraktionen – zurückgewonnen und die restlichen Verbrennungsrückstände deponiert werden (UBA, 2018). In Abbildung 11 ist der Verfahrensablauf einer Müllverbrennungsanlage dargestellt. In der anschließenden Schlackenaufbereitung werden die Schlacken in mehreren Durchgängen bis zu einer Korngröße von 7-8 mm gesiebt und die Eisenmetalle dann mittels eines Magnetabscheiders ab 3-4 mm Korngröße abgetrennt (Prisching, 2017) und über Förderbänder ausgeworfen. Die Abbildungen 12-16 zeigen Schlacken vor und nach der Aufbereitung aus der Aufbereitungsanlage Rinterzelt in Wien.

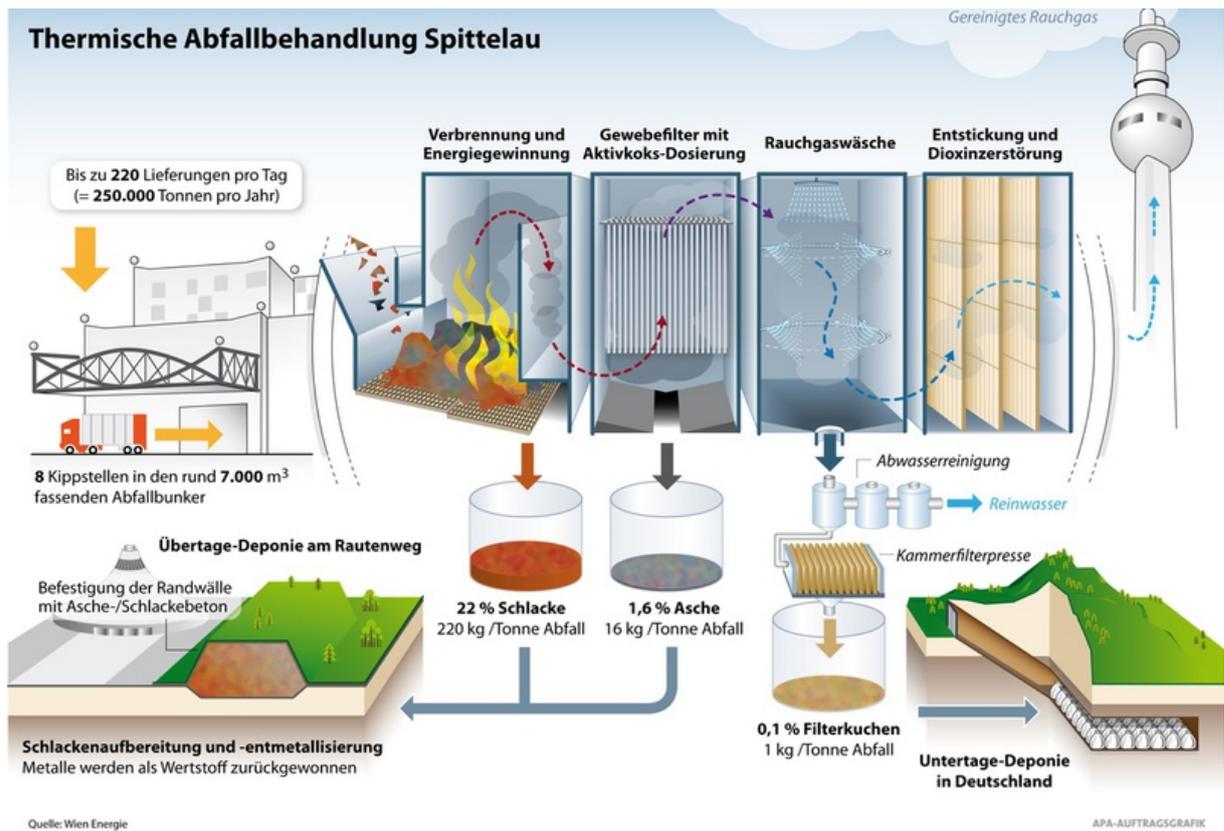


Abbildung 11: Schema einer thermischen Abfallbehandlung (Wien Energie, 2018)



Abbildung 12: Schlacke vor der Aufbereitung (Warrings, 2017)



Abbildung 13: große Fe-Metalle nach der Schlackenaufbereitung (Warrings, 2017)



Abbildung 14: Förderband mit Fe-Metallen (Warrings, 2017)



Abbildung 15: Schlacken für die Deponie (Warrings, 2017)



Abbildung 16: kleine Fe-Metalle nach der Schlackenaufbereitung (Warrings, 2017)

Bei der Metallabscheidung ist der Wirkungsgrad der Anlage abhängig von der Technik der Aufbereitung. Eine Zerkleinerung, Auftrennung von Agglomeraten, mehrmalige Siebung, ausreichend breite Förderbänder, Vermeidung einer Überbelastung der Magnetabscheidung, Stärke und Anordnung der Magnete haben entscheidenden Einfluss auf die Rückgewinnungsrate von Eisenmetallen aus der Schlackenaufbereitung (Lechner et al., 2010; Prisching, 2017). Lechner et al. (2010) schätzen nach Untersuchungen zur Rostascheaufbereitung in verschiedenen Anlagen und Ländern das Rückgewinnungspotential für Eisenmetalle auf 80 bis auf über 90% ein.

Bei der thermischen Behandlung in Müllverbrennungsanlagen entstehen neben den Schlacken auch ca. 30 kg Flugasche pro Tonne Abfall-Input mit einem Eisenanteil von etwa 1% (Huber et al., 2017). Flugaschen sind sehr kleine Partikel, die in der Rauchgasreinigung gefiltert und dann abgeschieden werden und anschließend deponiert oder in der Zementindustrie eingesetzt werden (Purgar et al., 2016).

2.9 Stahlerzeugung

Die Altmetalle aus der Sammlung und Aufbereitung aus der MBA und der Schlacke werden in der Eisen- und Stahlindustrie zur Stahlerzeugung eingesetzt. Dabei werden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Stahlherstellungsverfahren angewendet (Abbildung 17): der Hochofenprozess und das Elektrostahlverfahren. Im Hochofenprozess wird das Eisenerz zu Roheisen reduziert und der Kohlenstoffanteil

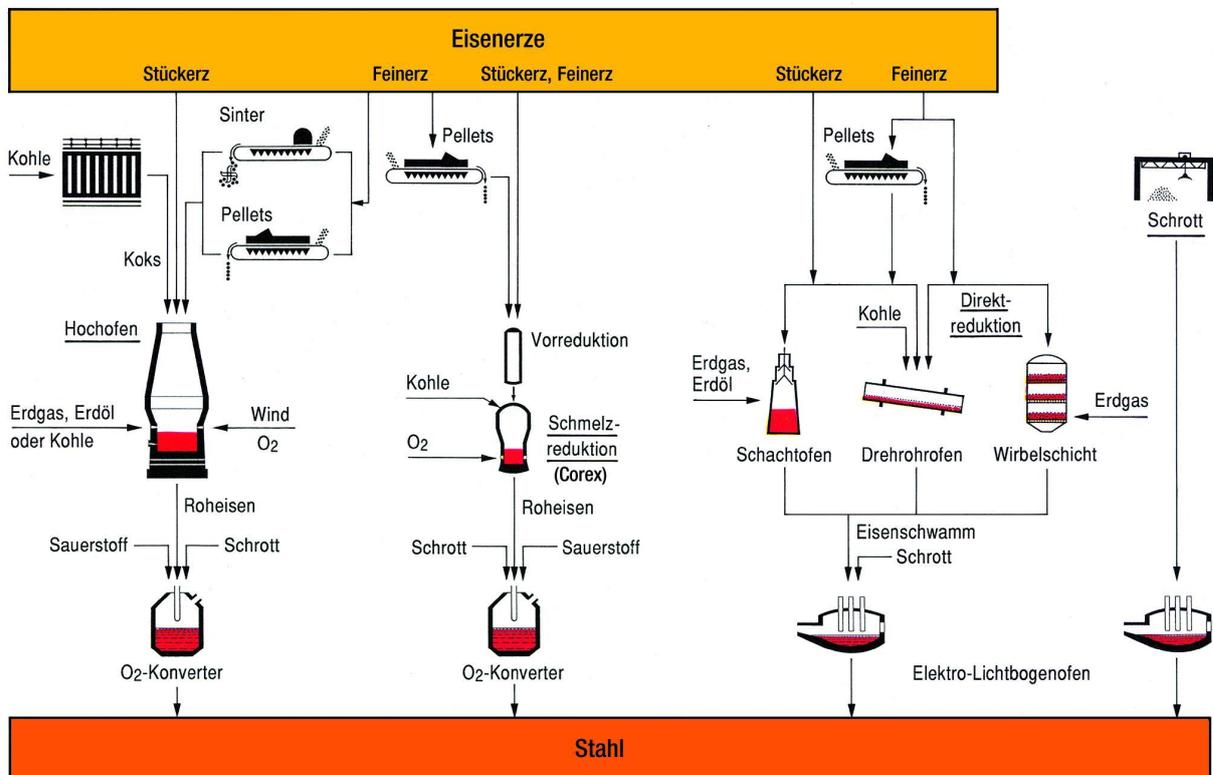


Abbildung 17: Verfahrensrouten zur Stahlerzeugung im Hochofen und Elektrostahlverfahren (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018)

im Roheisen gesenkt. Im Konverter wird das Roheisen durch Sauerstoffzugabe zu Stahl umgewandelt. Zur Kühlung des Konverters wird Eisen- und Stahlschrott beigemischt. Der Anteil an Schrott beträgt im Hochofenprozess maximal 25%. Im Elektrolichtbogenofen wird Schrott oder Roheisen mit Hilfe von elektrischer Energie (Graphitelektroden) geschmolzen. Hier kann bis zu 100% Schrott eingesetzt werden (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018). Bei der Voest Alpine AG, die 75% der Stahlerzeugung in Österreich betreiben, werden 23% Schrott eingesetzt, was die Obergrenze des technisch Machbaren darstellt (OÖ Nachrichten, 2018). In Deutschland beträgt der Schrottanteil insgesamt 46 %, was mit einem gestiegenen Anteil an der Elektrostahlroute bei der Rohstahlerzeugung zusammenhängt (Helmus & Randel, 2014).

Bei der Stahlerzeugung fallen u.a. 80 bis 150 kg Schlacken pro Tonne eingesetztem Rohstahl an, die zu 10-30% aus Eisenmetallen bestehen (Gara & Schrimpf, 1998). Diese Schlacken werden wieder in metallurgische Prozesse zurückgeführt oder im Straßenbau eingesetzt (Roos & Maile, 2008). Laut Auskunft der VOEST Alpine entstehen im Hochofenprozess keine nennenswerten und bei der Wiedereinschmelzung im Elektrostahlverfahren 2-2,5% Verluste (Schmid, 2017).

Bei der Rückgewinnung von Eisenmetallen liegen unterschiedliche Schrottqualitäten vor, was beim Einsatz als sekundäres Eisen allerdings keinen Einfluss auf die nachfolgende Stahlqualität hat (Roos & Maile, 2008), da die chemische Zusammensetzung des fertigen Stahls durch die sekundärmetallurgische Behandlung erfolgt (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018).

3. Material und Methode

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Abschätzung des österreichweiten Aufkommens und der Rückgewinnung von Eisenmetallen der aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle in Österreich vorgenommen. Hierzu wurden Markt- und Sortieranaysen und Daten aus öffentlich zugänglichen Abfallstatistiken verwendet, sowie Literaturrecherchen in wissenschaftlichen Artikeln, Fachbüchern und Studien zu Materialeigenschaften, Anwendung und Gewinnung von Eisenmetallen durchgeführt. Die Rückgewinnungsraten aus der Abfallaufbereitung wurden von den jeweiligen Anlagenbetreibern in Form von persönlichen Auskünften zur Verfügung gestellt oder, wenn nötig, aus Abfallwirtschaftsberichten ergänzt.

3.1 Materialflussanalyse (gemäß ÖNORM S2096)

Für die Materialflussanalyse (MFA) nach ÖNORM S2096 (Stoffflussanalyse - Anwendung in der Abfallwirtschaft) wurde die kostenlose Software STAN (kurz für SToffflussANalyse) in der Version 2.6 verwendet. Die Materialflussanalyse wurde als geeignetes Instrument angesehen, um Stoffe/Güter und ihre Massenströme und Bestände in einem komplexen System grafisch darstellen zu können (Brunner & Rechberger, 2017).

Die Verpackungen und Haushaltsgüter aus Eisenmetall und ihre Stoffströme nach Nutzungsende in der Abfallbehandlung (Sammlung, Sortierung, Rückgewinnung und

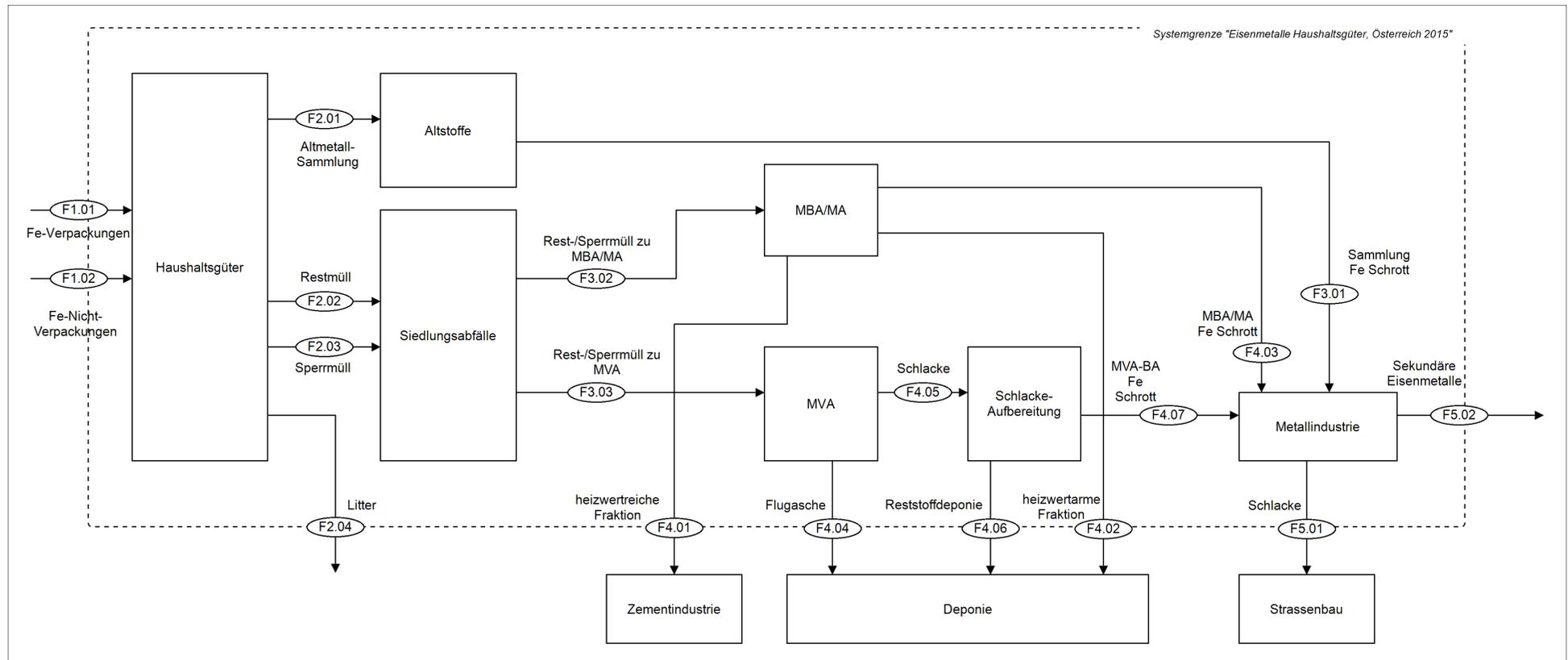


Abbildung 18: MFA Modell, Bilanz der Eisenmetalle aus Haushaltsgütern

Entsorgung) und im Recyclingprozess (Wiedereinschmelzung) lassen sich in der MFA (Abbildung 18) erfassen, darstellen, beschreiben und nachverfolgen:

- Haushaltsgüter (Verpackungen und Nichtverpackungen)
- Altstoffsammlung und Sortierung
- Mechanische Behandlung
- Thermische Behandlung
 - Müllverbrennung
 - Schlackenaufbereitung
- Metallurgische Behandlung bzw. Umschmelzprozesse
- Deponie
- Verluste

3.2 Datensammlung und Systembeschreibung

Die im BAWP (2018) und aus EUROSTAT (2017) vorliegenden Zahlen stammen aus dem Jahr 2015, daher wurde dieses als Basisjahr für die Berechnungen angenommen. Wenn keine Daten aus 2015 vorlagen, wurden diese aus anderen Zeiträumen ergänzt und gekennzeichnet. Die Daten für die Materialflüsse für Eisenmetall in der MFA basieren auf Berechnungen von öffentlich zugänglichen Abfallstatistiken und Abfallwirtschaftsplänen, sowie Jahresberichten von Sammel- und Verwertungsgesellschaften, Entsorgungs- und Abfallbehandlungsunternehmen. Auch hier wurden fehlende Daten aus der wissenschaftlichen Literatur oder Forschung ergänzt. Entsprechende Unsicherheiten der Daten wurden berücksichtigt (siehe Kapitel 3.3).

Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) werden in den Abfallbilanzen separat ausgewiesen. Somit sind in der gegenständlichen Arbeit Eisenmetalle aus EAGs nicht Teil der Untersuchung, weder was das Aufkommen noch die Rückgewinnungsraten betrifft (ARGE Hauer et al., 2016; BAWP, 2018).

3.3 Datencharakterisierung und Unsicherheiten

Eine Beurteilung der Datenunsicherheit wurde durchgeführt, um die Robustheit der Materialströme quantitativ hinsichtlich Transparenz und Reproduzierbarkeit darstellen zu können. So wurden für die quantitativen Daten Mittelwerte und Unsicherheiten berechnet, wobei als Maß für die Streuung der Messwerte eine Standardabweichung mit Normalverteilung angenommen wurde. Der nach Laner et al. (2016) angewendete Ansatz basiert auf einem Bewertungssystem für die Datenqualität und Datenunsicherheit.

Fünf Indikatoren für die Datenqualität (Zuverlässigkeit, Vollständigkeit, zeitliche Korrelation, geographische Korrelation und andere Korrelationen) wurden mit einem Bewertungssystem von 1 bis 4 erstellt, wobei eine 1 für die höchste (gute Datenqualität) und eine 4 für die niedrigste (schlechte Datenqualität) Datenqualität steht. Dabei können für die quantitativen Daten unterschiedliche Sensitivitäten (nicht sensitiv, mittlere und hohe Sensitivität) gewählt werden (Tabelle 6), deren Parameter die Wichtigkeit und Aussagekraft der Daten zur Beantwortung der Fragestellung wiedergeben (Laner et al., 2016). Haben sich z.B. das Aufkommen und die Zusammensetzung des Restmülls in den letzten zehn Jahren nicht verändert, so hat die zeitliche Korrelation nur eine geringe Sensitivität, da die verwendeten, vom Referenzjahr abweichende Daten das Ergebnis nicht oder nur kaum beeinflussen.

Die Zuverlässigkeit der Datenqualität bezieht sich auf die Methodik der Datengenerierung und gibt wieder, wie gut die Daten dokumentiert und verifiziert wurden. Die Vollständigkeit bewertet alle relevanten Massenströme und den Umfang der Daten. Zeitliche und geografische Korrelationen beziehen sich auf die Konsistenz und Abweichung der Daten in Zeit und Raum. Die andere Korrelation zeigt Werte an, die Bezug auf ein anderes Produkt oder eine andere Technologie nehmen. Manchmal beruhen Informationen auch auf Urteilen von Sachverständigen. In solchen Fällen wird die Zuverlässigkeit des Experten und dessen Meinung als einziger Indikator verwendet (Tabelle 7) (Laner et al., 2016).

Die Unsicherheiten wurden durch die Variationskoeffizienten (engl. *coefficient of variation*, CV) quantifiziert, wobei sie als relatives Streuungsmaß der Standardabweichung geteilt durch den Mittelwert definiert sind. Für jede einzelne Datenquelle wurde die relative Unsicherheit mittels der Indikatoren bestimmt. Die aggregierten Variationskoeffizienten der einzelnen Indikatoren geben die allgemeine Unsicherheit der Daten wieder:

$$CV_{tot} = \sqrt{CV_{Zuverlässigk.}^2 + CV_{Vollständigk.}^2 + CV_{geogr.Korr.}^2 + CV_{zeitl.Korr.}^2 + CV_{sonst.Korr.}^2}$$

Tabelle 6: Nach Laner et al. (2016) ermittelte Unsicherheiten. Indikatoren zur Datenqualität und Sensitivitätsstufen gelten für Materialflüsse

Indikatoren zur Datenqualität	Sensitivitätsstufe	Wert: 1	Wert: 2	Wert: 3	Wert: 4
		Variationskoeffizient (in %)			
Zuverlässigkeit	-	2,3	6,8	20,6	62,3
Vollständigkeit	Hohe Sensitivität	0,0	4,5	13,7	41,3
	Mittlere Sensitivität	0,0	2,3	6,8	20,6
Geographische Korrelation	Keine Sensitivität	0,0	1,1	3,4	10,3
Sonstige Korrelation	-	4,5	13,7	41,3	124,6

Tabelle 7: Definition der Qualität der Indikatoren und qualitative Bewertung der Kriterien zur Datenbewertung (modifiziert auf Basis von Laner et al. (2016))

Indikator	Definition	Wert: 1	Wert: 2	Wert: 3	Wert: 4
Zuverlässigkeit	Methodik der Datensammlung. Dokumentation der Daten, z.B. Bewertung der Probennahme, Überprüfung der Zuverlässigkeit und Reviewing-Prozesse.	Datengenerierung ist nach wissenschaftlichen Kriterien dokumentiert und peer reviewed.	Datengenerierung ist gut dokumentiert und transparent, jedoch unvollständig und nicht auf Validität überprüft.	Datengenerierung ist nicht beschrieben, das Prinzip ist jedoch klar, nicht auf Validität überprüft.	Methode der Datengenerierung nicht dokumentiert oder unklar.
Vollständigkeit	Zusammenstellung aller relevanten Massenflüsse. Mögliche Unter- und Überschätzungen wurden beurteilt.	Behandlung aller für die Beantwortung der Fragestellung relevanten Massenflüsse und -flüsse.	Es sind die quantitativ wichtigsten Prozesse zur Beantwortung der Fragestellung enthalten.	Teilweise Abdeckung der wichtigen Prozesse und Flüsse mit Datenlücken.	Es sind nur fragmenthafte Daten vorhanden. Wichtige Prozesse und Flüsse fehlen.
Zeitliche Korrelation	Kongruenz der verfügbaren Daten in Bezug auf die Zeitreferenz.	Daten beziehen sich auf die in der Fragestellung definierte Periode	Daten weichen um 1-5 Jahre ab.	Daten weichen um 5-10 Jahre ab.	Abweichung um mehr als 10 Jahre.
Geografische Korrelation	Kongruenz der verfügbaren Daten in Bezug auf die geographische Referenz.	Vorhandene Daten stimmen mit der in der Fragestellung definierten Region überein.	Daten stehen im Zusammenhang mit einer sozioökonomisch vergleichbaren Region (BIP, Konsumverhalten).	Es sind leichte Abweichungen mit einer sozioökonomisch vergleichbaren Region zu erkennen.	Wesentliche Unterschiede zu einer sozioökonomisch vergleichbaren Region.
Sonstige Korrelation	Kongruenz der verfügbaren Daten in Bezug auf Technologie, Produkte usw.	Vorhandene Daten stimmen mit der in der Fragestellung definierten Technologie, Produkte etc. überein.	Daten stehen im Zusammenhang mit vergleichbarer Technologie, Produkte etc.	Es sind Abweichungen zu vergleichbarer Technologie, Produkte etc. erkennbar, aber grobe Übereinstimmung	Wesentliche Unterschiede zu vergleichbarer Technologie, Produkte etc., Korrelationen sind wage und spekulativ
Expertenmeinung		Offizielle Experteneinschätzung auf empirischer Basis, transparente Vorgehensweise, voll informierter Experte	Strukturierte Expertenschätzung auf empirischer Basis oder transparentes Vorgehen von sachkundigem Experten	Experteneinschätzung ohne empirische Basis mit limitierter Dokumentation	Experteneinschätzung auf Basis spekulativer und nicht verifizierbarer Daten

3.4 Abfallaufkommen

Die Gesamtmenge an Eisenmetallen errechnet sich aus der Summe der in den Siedlungsabfällen (Sammlung Altmetalle, gemischter Siedlungsabfall und Sperrmüll) vorhandenen Menge an Verpackungen (F1.01) und Nichtverpackungen (F1.02) aus Eisenmetallen (exklusive EAGs). Die gesammelten Altmetalle (F2.01, bzw. F3.01) und die aus der Abfallaufbereitung (aus mechanischer Behandlung (F4.03) und der Schlackenaufbereitung nach der Müllverbrennung (F4.07) gewonnenen Eisenmetalle ergeben die Gesamtmenge an zurückgewonnenen Eisenmetallen.

3.4.1 Sammlung von Altmetallen

Die Mengen an separat gesammelten Altmetallen betragen 2015 für Verpackungen 28.900 t (ohne Abfallaufbereitung) und für Haushaltschrott 88.100 t (BAWP, 2018; Neubauer, 2017). Eine Studie zum Benchmarking der österreichischen Abfallwirtschaft nimmt für den gesammelten Metall-Haushaltsschrott einen Eisenanteil von 69% und für die gesammelten Metall-Verpackungen von 77% an (Brunner et al., 2015). Die Angaben für Haushaltschrott basieren dabei auf einer von Frischenschlager et al. (2010) durchgeführten Untersuchung zur Aufbereitung in Shredder- und Metallaufbereitungsanlagen, wobei durchgeführte Vorbehandlungen von bestimmten Abfallarten (u.a. Kraftfahrzeuge, EAGs, diverser Misch- und Sammelschrott) nicht berücksichtigt wurden. Bei den Verpackungen wurden der Input von Sortieranlagen für Metalle und der anfallende Sortierabfall anhand von Sortieranalysen untersucht. Eine Übersicht über die Zusammensetzung der gesammelten Altmetalle findet sich in Tabelle 9.

Neben der Sammlung durch Kommunen und Entsorgungsunternehmen gibt es auch eine sogenannte informelle Sammlung von Altstoffen oder reusefähigen Gegenständen. Hier sammeln Einzelpersonen oder Kleingruppen in Österreich wiederverwendbare Gegenstände, die sie ab Haus abholen. Der überwiegende Anteil wird ins Ausland transferiert, aber bis zu 25% werden auch in Österreich weiterverkauft oder wiederverwendet (Huber-Humer et al., 2018; Linzner et al., 2013).

Es liegen derzeit aber nur Schätzungen über die entnommenen Mengen an Eisenmetallen pro Jahr durch die informelle Sammlung vor. Wie hoch der Reuse-Anteil und die Rückgewinnung von Eisenmetallen aus der informellen Sammlung ist und in welchem Umfang diese und die Entsorgung von Abfällen innerhalb Österreichs stattfindet, ist nicht bekannt. Deshalb wurde in der gegenständlichen Arbeit der informelle Sektor für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen nicht weiter berücksichtigt.

3.4.2 Gemischter Siedlungsabfall

Das Aufkommen des gemischten Siedlungsabfalls betrug 2015 rund 1,43 Mio. t. Über den Anteil an Metallen bzw. Verpackungen und Nichtverpackungen im gemischten Siedlungsabfall gibt es keine einheitlichen Angaben. Die in den Statusberichten zur Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich und im Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 veröffentlichten Metallmengen im gemischten Siedlungsabfall sind als ungefähre Angaben, die „exemplarisch [anhand] von Analyse[n] von gemischtem Siedlungsabfall“ angenommen wurden, zu verstehen und

schwanken zwischen 2,3% und 4,6% (BAWP, 2018; BMLFUW, 2014, 2015). Auf Grundlage der Restmüll-Sortieranalysen aus unterschiedlichen Bundesländern (vgl. Kapitel 2.7, Tabelle 5) wurde für Österreich für Metalle im Restmüll ein gewichteter Mittelwert nach Einwohnerzahl mit 3,15% angenommen, der in etwa dem Metallanteil (3,01%) laut Wiener Altstoff- und Restmüllanalysen 2015/16 entspricht. Die Wiener Altstoff- und Restmüllanalysen 2015/16 ist die detaillierteste vorliegende Sortieranalyse in Österreich, die zudem sowohl nach Metallarten, als auch nach Verpackungen und Nichtverpackungen unterscheidet.

Allerdings erhöht sich der Metallanteil im Restmüll laut ARGE Hauer et al. (2016) auf 4%, wenn „Fraktionen berücksichtigt [werden], in denen Metalle enthalten sind, die aber nicht zu den metallischen Fraktionen gezählt werden. [Dazu zählen] sonstige Verbunde, Nichtverpackungen (Regenschirme, etc.), Holz (behandelt und unbehandelt), wie Möbelteile, Kunststoff Kinderspielzeug, Problemstoffe“.

Tabelle 8: Metallanteile im Restmüll, Österreich 2015

	Anteile (% , gewichtet)	Anteile (% , adaptiert*)
Metalle Gesamt	3,2%	4,0%
Metall-VP	1,8%	1,8%
Metall-NVP	1,4%	2,2%
Fe Gesamt	1,6%	2,4%
Fe-VP	0,9%	0,9%
Fe-NVP	0,7%	1,5%
Al Gesamt	1,5%	1,5%
Al-VP	0,9%	0,9%
Al-NVP	0,6%	0,6%
Sonstige Metalle Gesamt	0,1%	0,1%
Sonstige Metalle-VP	0,0%	0,0%
Sonstige Metalle-NVP	0,1%	0,1%
NE Gesamt	1,6%	1,6%
NE-VP	0,9%	0,9%
NE-NVP	0,7%	0,7%

* Der Gesamtanteil an Metallen erhöht sich von 3,2% auf 4,0%. Die Differenz wird ausschließlich dem Anteil Fe NVP zugerechnet, dessen Anteil um 0,8% auf 1,5% zunimmt.

Die Menge an Eisenmetallen aus dem Restmüll wurde um diese unberücksichtigten Fraktionen erweitert, wobei die Differenz zum errechneten Mittelwert (3,15%) ausschließlich den eisenhaltigen Nichtverpackungen zugeordnet wurde. Der adaptierte Mittelwert (4%) erhöht daher den Anteil von eisenhaltigen Nichtverpackungen von 0,67% auf 1,52%, während der Anteil an Verpackungen aus Eisenmetallen im Restmüll unverändert mit 0,88% angenommen werden kann. Die

angenommene Verteilung nach Verpackungen und Nichtverpackungen und Metallarten kann Tabelle 8 entnommen werden.

3.4.3 Sperrmüll

Laut BAWP (2018) betrug im Jahre 2015 das Sperrmüllaufkommen 244.200 t. Der in Altstoffsammelzentren gesammelte oder abgeholte Sperrmüll wird sortiert und zerkleinert und anschließend thermisch oder biologisch-mechanisch behandelt. Aussortierte Altmetalle gelangen dabei in Anlagen zum wertstofflichen Recycling (BMLFUW, 2017). Allerdings hat die Studie von Hauer et al. (2015) über das Verpackungsaufkommen in Österreich im Jahr 2013 auch die Fehlwürfe von Verpackungen in der Sperrmüllsammlung, also die nicht als Altstoffe aussortierten Materialien, wie Metalle, untersucht. Anhand dieser Ergebnisse ergibt sich ein Anteil von 0,39% für Verpackungen aus Eisenmetallen aus dem Sperrmüllaufkommen (F2.03). In der oben genannten Studie zum Verpackungsaufkommen wurden ausschließlich Verpackungen untersucht. Daher wurde für den Anteil an nicht aussortierten Nichtverpackungen aus Eisenmetall im Sperrmüll das Verhältnis von Verpackungen zu Nichtverpackungen aus den Restmüllanalysen (0,88% zu 1,52% lt. Tabelle 8) angenommen. Das Aufkommen von Nicht-Verpackung aus Eisenmetall im Sperrmüll wurde daher mit 0,66% geschätzt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Eisenmetalle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen aus Siedlungsabfällen in Österreich, 2015. Berechnungsgrundlage für das Abfallaufkommen

	Eisenmetalle	Aluminium	Kupfer (NE)	Shredder- und Sortierabfälle
Zusammensetzung Altmetalle ¹⁾				
Altmetalle - Verpackungen	77,0%	8,0%		15,0%
Altmetalle - Haushaltschrott	69,0%	2,7%	0,6%	27,7%
Zusammensetzung Restmüll ²⁾				
Verpackungen(VP)	0,88%	0,89%	0,00%	
Nichtverpackungen (NVP)	1,52%	0,62%	0,09%	
Zusammensetzung Sperrmüll ³⁾				
Verpackungen(VP)	0,39%	0,16%	0,00%	
Nichtverpackungen (NVP)	0,66%	0,11%	0,00%	

1) Benchmarking für die österreichische Abfallwirtschaft (Brunner et al., 2015)

2) Fe VP lt. Hauer et al. (2015); gewichteter Mittelwert, Berechnung lt. Abfallanalysen

3) Verpackungsaufkommen in Österreich 2013; NVP lt. Verhältnis VP/NVP aus RM-Analysen (Hauer et al., 2015)

3.4.4 Littering

Neben der Entsorgung der Siedlungsabfälle über getrennte Sammlung oder Restmüll wird Abfall auch achtlos an öffentlichen Plätzen und in der Natur weggeworfen und wird als Littering bezeichnet. Dieser Abfall wird im Allgemeinen als Straßenkehricht oder in intensiven und regelmäßigen „Flurreinigungs-“ oder „Frühjahrsputzaktionen“ von Gemeinden eingesammelt (Loimayr, 2010). Die Abfälle können aber auch in Gewässer gelangen. Eine Studie zum Treibgutauflkommen in der Donau hat festgestellt, „dass die Abfallmenge, welche in die Donau gelangt zum Gesamtabfallaufkommen in Wien verschwindend gering ist“ (Clark & Pucher, 2014). Zudem werden Abfälle und damit Ressourcenverluste in Gewässern durch Auffangsysteme an Flusskraftwerken minimiert (Verbund AG, 2017).

Weitere Untersuchungen oder Studien zu Littering liegen nicht vor, daher konnten keine belastbaren Angaben zu Verlusten durch Littering (F2.04) von Haushaltsgütern aus Eisenmetallen in Österreich gemacht werden. Aufgrund dieser Datenlücken wird dieser Materialfluss in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

3.5 Abfallbehandlung

Der gemischte Siedlungsabfall (Restmüll) wird zu 81% „direkt oder nach Aufbereitung in einem ersten Behandlungsschritt“ thermisch behandelt und zu 18% mechanisch-biologisch aufbereitet. Der Sperrmüll wird größtenteils sortiert und „nach einem Zerkleinerungsprozess überwiegend thermisch oder biologisch“ behandelt (BAWP, 2018).

In der Müllverbrennung (MVA) mit anschließender Schlackenaufbereitung und MBA/MA werden neben Siedlungs- auch Gewerbeabfälle behandelt. Folglich ist die Gesamtmenge der zurückgewonnenen Wertstoffe auf die Gesamtmenge aller behandelten Abfälle, also auf behandelte Siedlungs- und Gewerbeabfälle, bezogen. Die gesamt in den MVAs (F3.03) und MBAs/MAs (F3.02) zurückgewonnenen Eisenmetalle wurden daher für die Menge der Eisenmetalle aus dem Rest- und Sperrmüll berechnet. Die stoffliche Zusammensetzung der behandelten Gewerbeabfälle ist unbekannt, daher wurde eine ähnliche stoffliche Zusammensetzung für Siedlungs- und Gewerbeabfällen angenommen, was auch Untersuchungen zu Siedlungs-, Industrie- und Gewerbeabfällen in der Schweiz bestätigen (Morf, 2006).

Es waren nicht für alle Abfallaufbereitungsanlagen Angaben zu Abfall-Input und Rückgewinnungsmengen von Metallen verfügbar. Die gewonnenen Daten basieren auf Angaben von Anlagenbetreibern aus sowohl öffentlich zugänglichen Informationen, als auch aus vertraulichen, nicht-veröffentlichten, persönlichen Mitteilungen. Letztere sind nicht zur Veröffentlichung bestimmt und wurden daher in aggregierter und anonymisierter Form wiedergegeben, so dass keine Daten einzelner Anlagen offengelegt wurden (vgl. Tabelle 11, MVA Lenzing, Zistersdorf, Wels). Bei den zurückgewonnenen metallischen Wertstoffen handelt es sich um Bruttomengen mit nach Experteneinschätzung bis zu 20% nichtmetallischer Anteile (Anhaftungen, Störstoffe etc.) (Prising, 2017).

3.5.1 Mechanische Aufbereitung

Laut BAWP (2018) wurden 450.000 t Rest- und Sperrmüll mechanisch in MBAs bzw. MAs aufbereitet. Die Daten zu den behandelten Abfallmengen und Rückgewinnungsraten von Metallen wurden aus Rückmeldungen der Anlagenbetreiber der MBAs gewonnen. Es wurden nicht in allen Anlagen Metalle zurückgewonnen bzw. gab es hierfür keine Auskünfte über zurückgewonnene Metallmengen (siehe Tabelle 10). Für die mechanischen Aufbereitungsanlagen waren keine Daten verfügbar (vgl. Neubauer & Öhlinger, 2008).

In 6 MBAs wird eine mechanische Aufbereitung von Metallen betrieben, 5 Anlagen gewinnen keine Metalle zurück und für 3 Anlagen waren keine Daten verfügbar. Laut Daten aus den Rückmeldungen der Anlagenbetreiber wurden in diesen Anlagen rund 342.000 t Abfall behandelt, der zu 69,3% (238.000 t) aus Rest- und Sperrmüll bestand. Daraus ergab sich eine Rückgewinnung von durchschnittlich 23 kg Eisenmetalle pro eingesetzter t Rest- und Sperrmüll, die auch für die restlichen 3 MBAs angenommen wurde, für die keine Daten verfügbar waren. Bei einer laut BAWP (2018) gesamt in MBAs behandelten Abfallmenge von 439.000 t ergibt sich daher für die MBAs eine Rückgewinnung von Eisenmetallen von 8.500 t aus Rest- und Sperrmüll (304.000 t).

Für die 30,7% der in MAs (146.000 t) behandelten Mengen Rest- und Sperrmüll wurde eine ähnliche Rückgewinnung wie in der mechanischen Aufbereitung (27,3 kg Eisenmetalle pro t Input Rest- und Sperrmüll) der MBAs angenommen, da keine Daten zu den MAs vorlagen und von einem Einsatz einer vergleichbaren Technologie in den MAs mit gleicher Effizienz der Magnetabscheidung von Eisenmetallen wie in den MBAs ausgegangen wurde. Daraus ergab sich eine Rückgewinnung von 4.000 t Eisenmetallen aus MAs und insgesamt 12.500 t aus der mechanischen Aufbereitung (MBAs und MAs).

Die aus der mechanischen Aufbereitung zurückgewonnenen Eisenschrotte (F4.03) werden in der Metallindustrie wiedereingesetzt. Die in diesen Fraktionen noch vorhandenen Eisenmetalle, die aufgrund kleiner Partikelgröße und/oder unzureichender Leistungsfähigkeit der verwendeten Technologie nicht als Altstoffe zurückgewonnenen wurden, werden demnach nicht als Eisenmetall zurückgewonnen und in der vorliegenden Arbeit daher als Verluste für die stoffliche Verwertung angesehen. Diese Anteile werden als heizwertreiche Fraktion aus der mechanisch-biologischen Aufbereitung in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff (EBS) zur Klinkerproduktion (F4.01) eingesetzt bzw. als heizwertarme Fraktion deponiert (F4.02).

Tabelle 10: Zurückgewonnene Metalle aus MBA und MA, Österreich 2015

MBA	Abfall-Input	Metalle	Fe	Anteil Rest-/Sperrmüll	
	Massen [t, gerundet]				[%]
lt. BAWP (2018)	439.000				
mit mechanischer Aufbereitung					
Siggerwiesen	95.000	3.700	3.300	75.000	79,3%
Zell am See	29.000	900	800	28.000	96,6%
St. Pölten	31.000	1.200	1.100	29.000	94,2%
Oberpullendorf	73.000	2.100	1.700	73.000	100,0%
Lavant	15.000	500	500	14.000	95,0%
Kufstein	14.000	400	400	13.000	95,0%
Summe	256.000	8.800	7.800		
Rest-/Sperrmüll		7.900	7.000	232.000	90,7%
ohne mechanische Aufbereitung					
Halbenrain	54.000			3.200	6,0%
Fischamend	24.000			0	0,0%
Aich-Assach	10.000			2.000	21,0%
Wiener Neustadt	nur biologische Trocknung				
Steinthal	nur Nachrotte				
Summe	87.000			5.000	6,0%
keine Daten verfügbar					
Frohnleiten					
Liezen					
Hartberg					
Summe	96.000	1.700	1.500	66.000	69,3%
Anteil Rest-/Sperrmüll		Rückgewinnung in kg pro t Input			
mechanische Aufbereitung		31	27		
MBA Gesamt		23	20		
	Massen [t, gerundet]				[%]
MBA Gesamt	439.000	9.600	8.500	304.000	69,3%
MA		4.500	4.000	146.000	
MBA/MA		14.100	12.500	450.000	

Quellen: (ABV Westtirol, 2017; Am Ziegelofen, 2017; AWV Hartberg, 2017; AWV Liezen, 2017; AWV Osttirol, 2017; AWV Schladming, 2017; Rottner Deponie, 2017; RZ Ahrental, 2017; Servus Abfall, 2017; Thöni, 2017; UDB, 2017; Umweltschutzanlagen Siggerwiesen, 2015; WNSKS, 2017; ZEMKA, 2017)

3.5.2 Thermische Behandlung und Schlackenaufbereitung

Laut BAWP (2018) wurden 1,36 Mio. t Rest- und Sperrmüll thermisch aufbereitet. Nach Angaben von Anlagenbetreibern entstanden bei einem Abfall-Input von 2,3 Mio. t etwa 520.000 t Schlacke, woraus bezogen auf den Anteil verbranntem Rest- und Siedlungsmüll 18.700 t Eisenmetalle oder 13,8 kg Eisenmetalle pro t Abfall-Input aus der Schlackenaufbereitung der Müllverbrennung zurückgewonnen wurden (Tabelle 11).

Tabelle 11: Metallrückgewinnung aus Schlackenaufbereitung der Müllverbrennungsanlagen

MVA	Abfall-Input	Metalle	Fe
	Massen [t, gerundet]		
Wien [1]	705.000	14.500	13.000
RHKW Linz [2]	180.000	1.400	800
TRV Niklasdorf	110.000	1.300	900
MVA Dürnrohr	483.300	8.800	8.800
KRV Arnoldstein	96.000	500	500
RVL Lenzing [3] MVA Zistersdorf [3] MVA Wels [3] [4]	727.500	9.800	7.700
Summe	2.301.800	36.300	31.700
Anteil Rest-/Sperrmüll	1.226.100	19.300	16.900
	Rückgewinnung in kg pro t Input		
		15,8	13,8

[1] Insgesamt 4 Anlagen (Flötzersteig, Pfaffenau, Spittelau, Simmering), inkl. Mengen aus Splittinganlage

[2] inkl. Mengen aus Splittinganlage

[3] Mengen für 2014, keine öffentlich zugänglichen Daten

[4] 2 Anlagen

Quellen: (ENAGES, 2017; Energie AG, 2017; EVN, 2016; KRV, 2017, 2018; Linz AG 2017; Schwarzböck & Fellner, 2015; Stadt Wien, 2017; Stadt Wien MA 48, 2016)

Das aus der Schlackenaufbereitung zurückgewonnene Eisenmetall wird der Metallindustrie als recycelter Eisenschrott zugeführt (F4.07). Die in der Schlacke verbleibenden, nicht zurückgewonnenen Eisenmetalle werden deponiert (F4.06). Anzumerken ist noch, dass bei der Rückgewinnung durch das Versintern der

Eisenmetallen (Verklumpen der Schlacke) das Ausgangsmaterial nicht mehr eindeutig erkannt werden kann. Aus diesem Grund kann in weiterer Folge nicht mehr zwischen Verpackungsmaterialien und Haushaltsschrott unterschieden werden (Deike et al., 2012).

Bei der Verbrennung werden pro 1 t Abfall-Input ca. 0,3 kg Eisen mit der Flugasche über die Rauchgasreinigung abgetrennt und abgeschieden. Die Flugasche wird deponiert oder als gefährlicher Abfall entsorgt. In der MFA-Darstellung wurde keine Unterscheidung zwischen Deponierung (F4.04) und Entsorgung als gefährlicher Abfall vorgenommen, da keine Daten zu den unterschiedlichen Entsorgungswegen vorliegen und dies für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung irrelevant ist.

3.5.3 Recycling der Eisenmetalle

Die Recyclingraten für Siedlungsabfälle können, wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, entsprechend den Zielvorgaben laut EU-Richtlinie 2008/98/EG nach vier unterschiedlichen Methoden berechnet werden (EC, 2011), wobei in Österreich, wie in den meisten EU-Mitgliedsstaaten, die Berechnungsmethode 2 angewendet wird.

Eine Studie von Eunomia (2014) zeigt, dass es sowohl Probleme mit der Definition oder Interpretation von Begriffen als auch mit der Art und Weise gab, wie die Erfüllung der Vorgaben interpretiert wurde. Zudem variierte auch die Art und Weise, in der die Definitionen angewendet wurden, zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten. So wurden beispielsweise die Eisenmetallmengen nach den unterschiedlichsten Ansätzen als recycelt gewertet: „Material zum Recycling gesammelt; Ausgabe aus Sortieranlagen; Materialien, die von Schrotthändlern zur Wiederaufbereitung gesendet werden; in Schmelzwerken erhaltenes Material“ (Eunomia, 2014). Hier gibt es demnach Spielraum in der Auslegung der Gesetzgebung, auch was die Verluste bei der stofflichen Verwertung betrifft. So heißt in der Entscheidung der Europäischen Kommission zur Festlegung der Tabellenformate gemäß der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, dass, wenn „der Ausstoß einer Sortieranlage ohne nennenswerte Verluste einem Recycling- oder einem sonstigen Verfahren der stofflichen Verwertung zugeführt wird, kann das Gewicht dieser Abfälle als das Gewicht der zur Wiederverwendung vorbereiteten, recycelten oder auf andere Weise stofflich verwerteten Abfälle angesehen werden“ (EC, 2005). Eine genaue Definition, wie hoch die nennenswerten Verluste sein dürfen, ist nicht gegeben.

Mit Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle soll die Recyclingmenge von Siedlungsabfällen zukünftig nur noch als die Menge bestimmt werden, die einem Recyclingverfahren zugeführt wird, ohne die Verluste, die bei der Abfallsortierung oder anderer vorgeschalteter Verfahren entstehen. Eine „durchschnittliche Verlustquote während des Sortierprozesses soll von der EU-Kommission bis spätestens Ende 2019 festgelegt werden. Allerdings ist den Mitgliedsstaaten „unter strikten Bedingungen und als Ausnahme von der allgemeinen Regel gestattet, das Gewicht der recycelten Siedlungsabfälle auf der Grundlage der Messung des Outputs jedes Abfallsortierverfahrens zu bestimmen“, wobei die Bestimmung der Verlustquote durch die einzelnen Mitgliedsstaaten in „Qualitätskontrollberichten“ begründet werden muss (Abl. L 150, 2018).

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die bei der Abfallbehandlung und Sortierung anfallenden Verluste durch Anhaftungen, Verunreinigung oder Feuchtigkeit

zu berücksichtigen. Die Angaben aus den Sortieranalysen zum Restmüll und die separat gesammelten Mengen an Altmetallen sind Nettomengen, also Eisenmetalle ohne Verunreinigungen, Anhaftungen etc., während bei der mechanischen Behandlung in der MBA und der Schlackenaufbereitung aus der Müllverbrennung keine Angaben zu Verlusten gemacht werden konnten. Hier muss daher von Bruttomengen ausgegangen werden (Prisching, 2017). Da sie laut bestehender Rechtsauslegung als nicht nennenswerte Verluste gelten (EC, 2005), solange die Verluste nicht mehr als 10% betragen (EC, 2015), können die der Metallindustrie als Sekundärmaterial zugeführten Bruttomengen der Eisenmetalle demnach als recycelte Menge betrachtet werden. Bei den metallurgischen Prozessen in der Metallindustrie entstehen Verluste bei der Wiedereinschmelzung (Schlacken).

Die recycelten Eisenmetalle abzüglich dieser Verluste sind die Gesamtmengen an sekundären Eisenmetallen (F5.02), die der Metallindustrie für neue Produkte zur Verfügung stehen. Die Verluste bei der Wiedereinschmelzung wurden laut Einschätzung der VOEST Alpine mit 1% angenommen (Schmid, 2017),

Die Schlacken aus dem Einschmelzprozess werden vorwiegend im Straßenbau eingesetzt, da sie aber keine wertstoffliche Rückgewinnung im Sinne eines Einsatzes als sekundäres Eisen darstellen, wurden sie als Verluste gewertet (F5.01).

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Abschätzung des Abfallaufkommens und der Rückgewinnung von Eisenmetallen aus Haushaltswaren und Verpackungen aus Siedlungsabfällen

In Österreich betrug das Abfallaufkommen von aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle aus Eisenmetall im Jahr 2015 insgesamt 120.100 ± 4.000 t oder 13,9 kg pro Einwohner. Davon entfielen ungefähr 36.000 ± 3.000 t (4,1 kg pro Einwohner) auf Verpackungen und 84.000 ± 4.000 t (9,8 kg pro Einwohner) auf Nichtverpackungen.

Von den 120.100 t Abfallaufkommen an Eisenmetallen wurden 91,7% (110.200 ± 3.000 t oder 12,6 kg pro Einwohner) einer stofflichen Verwertung oder Recycling zugeführt, wobei die Recyclingrate für Nichtverpackungen aus Eisenmetallen mit 92,3% (77.900 t oder 9,8 kg pro Einwohner) etwas höher ist als bei Verpackungen aus Eisenmetallen (89,9% oder 32.200 t, bzw. 4,2 kg pro Einwohner).

Vom Abfallaufkommen wurden 83.200 ± 2.800 t (68,9%) über die Altstoffsammlung zurückgewonnen. In den Rest- und Sperrmüll gelangten 37.100 ± 1.100 t Eisenmetalle, wovon 72,8% zurückgewonnen werden (27.000 ± 1.100 t). Der Rest- und Sperrmüll wurde thermisch, bzw. mechanisch-biologisch behandelt. Die Rückgewinnung aus der mechanisch-biologisch Aufbereitung betrug 100,0% (10.100 ± 600 t). Aus der

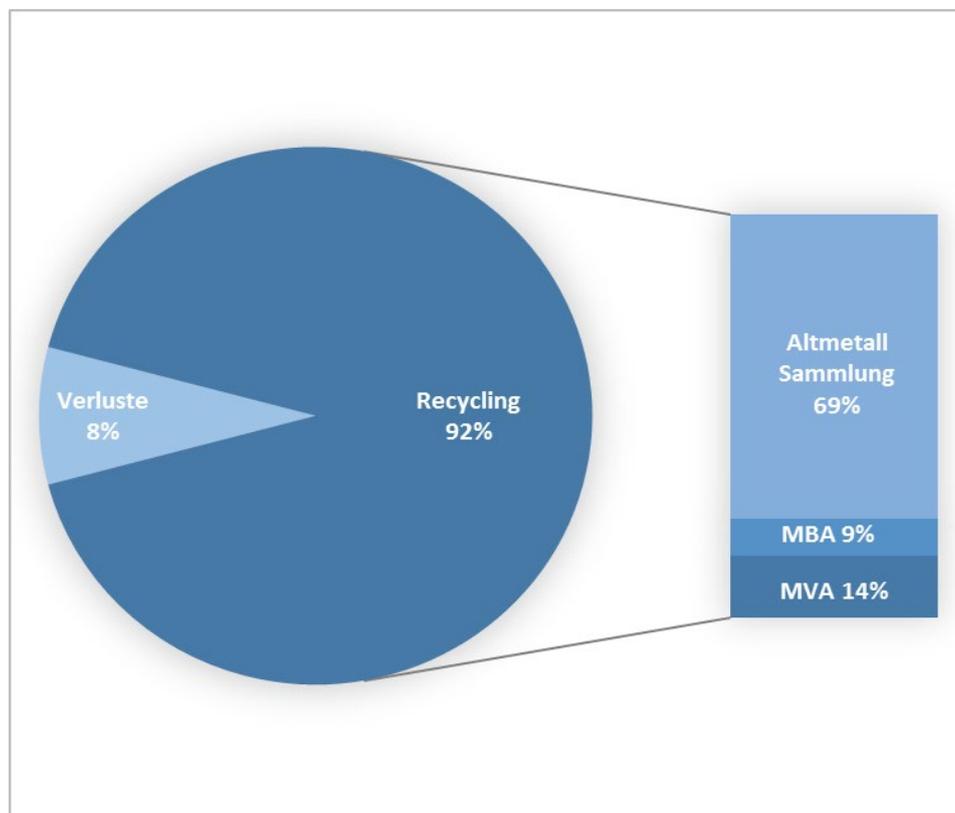


Abbildung 19: Rückgewinnung und Verluste von Eisenmetallen (in %) aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015

Tabelle 12: Massenströme von Abfallaufkommen und Abfallbehandlung für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015

	Input	Rückgewinnung		Verluste	
	[gerundet, t]	[gerundet, t]	[%]	[gerundet, t]	[%]
Abfallaufkommen	120.100	110.700	91,7%	10.100	8,0%
Verpackungen	35.800	32.200	89,9%		
Nichtverpackungen	84.300	77.900	92,3%		
Sammlung		83.200	68,9%		
Verpackungen		22.300	62,3%		
Nichtverpackungen		60.800	72,0%		
Rest-/Sperrmüll	37.100	27.000	72,8%	10.100	27,2%
Verpackungen	13.600	9.900		3.700	
Nichtverpackungen	23.500	17.100		6.400	
MBA	10.100	10.100	100,0%		0,0%
Verpackungen	3.700	3.700			
Nichtverpackungen	6.400	6.400			
MVA	27.000				
Verpackungen	9.900				
Nichtverpackungen	17.100				
Flugasche				400	1,5%
Verpackungen				100	
Nichtverpackungen				300	
Schlacke	26.600	16.900	63,5%	9.700	36,5%
Verpackungen	9.800	6.200		3.600	
Nichtverpackungen	16.800	10.700		6.100	
Metallindustrie	110.700	109.100	98,6%	1.100	6,6%
Verpackungen	32.500	32.000		300	
Nichtverpackungen	78.100	77.000		800	

Schlackenaufbereitung der Müllverbrennungsanlagen wurden 63,5% der Eisenmetalle (16.900 ± 1.100 t) zurückgewonnen (Abbildung 19).

Die Verluste (10.100 ± 500 t) entstehen hauptsächlich während der Schlackenaufbereitung (9.700 ± 400 t), während bei der Müllverbrennung selbst geringe Verluste über die Flugaschen (400 ± 30 t) auftreten. Bei den metallurgischen Prozessen der Wiederverwertung der Eisenmetalle in der Stahlindustrie kommt es zu Verlusten durch die Schlackenbildung (1.100 ± 500 t). Die Menge an Sekundäreisen, die für neue Anwendungen der Metallindustrie genutzt werden kann, reduziert sich damit auf 109.100 ± 3.000 t.

Eine detaillierte Aufstellung der Massenströme von Abfallaufkommen und der Rückgewinnungsmengen und Verluste in der Abfallbehandlung für Eisenmetalle ist aus Tabelle 12 ersichtlich.

4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

4.2.1 Partitionierung der Materialflüsse nach Behandlungsprozessen

Die der gegenständlichen Arbeit zugrunde liegenden Ergebnisse anhand der Materialflüsse und Prozesse sind in Abbildung 20 grafisch dargestellt und sollen an dieser Stelle noch einmal kurz zusammenfassend erläutert werden (vgl. auch Tabelle 13).

Das Abfallaufkommen an Verpackungen (35.800 t, F1.01) und Nichtverpackungen (84.300 t, F1.02, Haushaltsgüter) ergibt die Menge der aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle (120,100 t). Ein Teil wird als Altstoffe (Altmetalle) separat gesammelt (83.200 t, F2.01) bzw. über den Restmüll entsorgt (34.500 t, F2.02). Hinzu kommen noch die Eisenmetalle in der Sperrmüllsammlung (2.600 t, F2.03). Ein Teil wird unsachgemäß weggeworfen, allerdings ist die Menge an Littering (0 t, F2.04) vernachlässigbar. Die informell gesammelten metallhaltigen Güter werden hier aufgrund einer fehlenden belastbaren Datenbasis nicht berücksichtigt.

Die Altstoffe werden als Eisenschrott in der Metallindustrie wiederverwertet (83.200 t, F3.01), während die Eisenmetalle aus dem Rest- und Sperrmüll mechanisch in einer MBA/MA behandelt (10.100 t, F3.02) oder einer Müllverbrennung zugeführt werden (27.000 t, F3.03). Aus den Schlacken der Müllverbrennung (26.600 t, F4.05) werden Eisenmetalle (16.900 t, F4.07), wie auch aus der Aufbereitung in den MBAs/MAs (10.100 t, F4.03), zurückgewonnen und ebenfalls in der Metallindustrie verwertet.

Die nicht aussortierten Eisenmetalle aus der MBA/MA werden als heizwertreiche Fraktion der Zementindustrie (0 t, F4.01) zugeführt, bzw. als heizwertarme Fraktion deponiert (0 t, F4.02). Die bei der Müllverbrennung abgeschiedene Flugasche wird deponiert, bzw. als gefährlicher Abfall (der in der gegenständlichen Arbeit nicht separat ausgewiesen wurde) entsorgt (400 t, F4.04). Die nicht verwertbaren Reststoffe der Müllverbrennung (entmetallisierte Schlacken) werden ebenfalls deponiert (9.700 t, F4.06).

Bei der Wiederverwertung der Eisenmetalle in der Metallindustrie entstehen im Rahmen der metallurgischen Prozesse Schlacken (1.100 t, F5.01), die im Straßenbau eingesetzt werden. Die Menge an sekundären Eisenmetallen in neuen Produkten beträgt demnach 109.100 t (F5.02), was etwa 1,1% des inländischen Materialverbrauchs an Metallen entspricht.

Tabelle 13: Materialflüsse und Prozesse mit Unsicherheiten für Eisenmetalle aus Siedlungsabfällen (ohne EAGs), Österreich 2015

Fluss	Flussname	Massen	Unsicherheit +/-	Prozesse	
		[t, gerundet]		von	nach
F1.01	Fe-Verpackungen	35.800	3.000	Input	Haushaltsgüter
F1.02	Fe-Nichtverpackungen	84.300	4.000	Input	Haushaltsgüter
F2.01	Altmittel-Sammlung	83.200	2.800	Haushaltsgüter	Altstoffe
F2.02	Restmüll	34.500	1.200	Haushaltsgüter	Siedlungsabfälle
F2.03	Sperrmüll	2.600	400	Haushaltsgüter	Siedlungsabfälle
F2.03	Litter	0	0	Haushaltsgüter	Output
F3.01	Sammlung Fe Schrott	83.200	2.800	Altstoffe	Schmelzwerk
F3.02	Rest-/Sperrmüll (MBA/MA)	10.100	600	Siedlungsabfälle	MBA/MA
F3.03	Rest-/Sperrmüll (MVA)	27.000	1.000	Siedlungsabfälle	MVA
F4.01	heizwertreiche Fraktion (Zementindustrie)	0	0	MBA/MA	Zement-Industrie
F4.02	heizwertarme Fraktion (Deponie)	0	0	MBA/MA	Deponie
F4.03	MBA/MA Fe Schrott	10.100	600	MBA/MA	Schmelzwerk
F4.04	Flugasche	400	40	MVA	Deponie
F4.05	Schlacke	26.600	1.000	MVA	Schlacke- Aufbereitung
F4.06	Reststoffdeponie	9.700	400	Schlacke- Aufbereitung	Deponie
F4.07	MVA-BA Fe Schrott	16.900	1.100	Schlacke- Aufbereitung	Schmelzwerk
F5.01	Schlacke	1.100	500	Schmelzwerk	Strassenbau
F5.02	Sekundäre Eisenmetalle	109.100	3.000	Schmelzwerk	Output

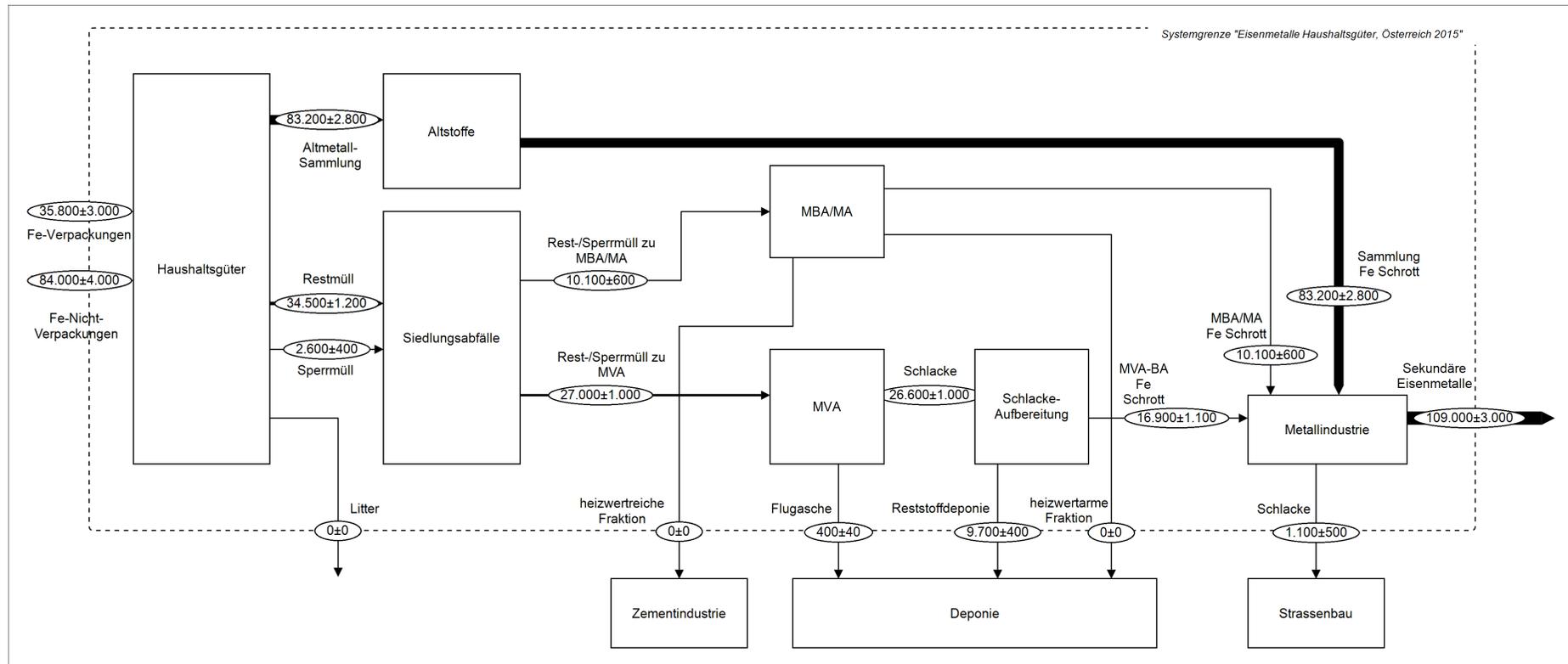


Abbildung 20: Ergebnisse MFA von aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen entsorgten Siedlungsabfälle aus Eisenmetall, Österreich 2015 (ohne EAGS)

4.2.2 Unsicherheiten und Datenlücken

Die den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Daten weisen vereinzelt größere Lücken und Unsicherheiten aus, die im Nachfolgenden zusammengefasst werden sollen.

Das Abfallaufkommen an Eisenmetallen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen aus Siedlungsabfällen wurde über die als Altmetall gesammelten und im Rest- und Sperrmüll befindlichen Mengen an Verpackungen und Nichtverpackungen (Haushaltsgütern) aus Eisenmetall bestimmt. Die Angaben zu der Menge an Eisenmetallen im Rest- und Sperrmüll beruhen auf Sortieranalysen, wobei Nichtverpackungen in Sortieranalysen selten untersucht werden und keine Aufgliederung nach Produkten oder Materialzusammensetzung vorgenommen wird. Untersuchungen zu Sperrmüll sind nur in Wien zu Verpackungen durchgeführt worden. Daher sind die Annahmen für die Anteile von Eisenmetall im Sperrmüll ($\pm 16\%$) und damit auch das Abfallaufkommen von Nichtverpackungen ($\pm 17\%$) mit großen Unsicherheiten verbunden.

Bei der Rückgewinnung von Eisenmetallen aus der Abfallaufbereitung beruhen die zurückgewonnenen Mengen an Eisenmetallen aus der mechanischen Aufbereitung bzw. der Schlackenaufbereitung nach der Müllverbrennung auf Angaben von Anlagenbetreibern. Es waren nicht von allen Anlagen Daten verfügbar. Die Rückgewinnungsmengen sind Bruttomengen, der Anteil der Störstoffe (Verluste) wird nicht ausgewiesen. Daher wurden für die Rückgewinnungsmengen aus MVAs und MBAs/MAs Unsicherheiten von $\pm 17\%$ angenommen. Die Herkunft und Zusammensetzung des Abfall-Inputs, besonders in MVAs, ist sehr heterogen, weshalb auch hier hohe Unsicherheiten ($\pm 17\%$) für den Anteil an Eisenmetallen im Abfall-Input angenommen werden müssen.

Daten zum Anteil von Nichtverpackungen aus Eisenmetall im Siedlungsabfall sind nur unzureichend und unvollständig verfügbar, zudem fehlt bei der Rückgewinnung von Eisenmetallen aus der mechanischen und Schlackenaufbereitung eine Differenzierung zwischen Verpackungen und Nichtverpackungen.

Die berechneten Unsicherheiten für die einzelnen Prozesse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Unsicherheiten. Berechnungen der einzelnen Materialflüsse

Indikator	Sensitivität	1	2	3	4					
Zuverlässigkeit	-	2,26%	6,84%	20,64%	62,32%					
Vollständigkeit/zeitliche/geogr./ sonstige Korrelation	Hoch	0,00%	4,53%	13,67%	41,28%					
	Mittel	0,00%	2,26%	6,84%	20,64%					
	Niedrig	0,00%	1,13%	3,42%	10,32%					
Expertenmeinung		4,53%	13,67%	41,28%	124,64%					
Code	Flüsse	Massen	Zuverlässig- keit	Vollständig- keit	Zeitliche Korrelation	Geograph. Korrelation	Sonstige Korrelation	Experten- meinung	Gesamt	
		[t]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[t]	[%]
F1.01	Fe-Verpackungen	35.798	2,26%	4,53%	0,00%	6,84%	0,00%		3.046	8.51%
F1.02	Fe-Nicht-Verpackungen	84.115	2,26%	13,67%	0,00%	6,84%	0,00%		12.999	15.45%
F2.01	Altmittel-Sammlung	83.042	2,26%	0,00%	4,53%	0,00%	0,00%		4.205	5.06%
F2.02	Restmüll	34.308	2,26%	4,53%	4,53%	6,84%	4,53%		3.653	10.65%
F2.03	Sperrmüll	2.563	2,26%	13,67%	4,53%	6,84%	4,53%		429	16.73%
F2.04	Littering	0	2,26%	4,53%	4,53%	0,00%	0,00%		0	6.79%
F3.01	Sammlung Fe Schrott	83.042	2,26%	0,00%	4,53%	0,00%	0,00%		4.205	5.06%
F3.02	Rest-/Sperrmüll zu MBA	9.899	2,26%	4,53%	2,26%	2,26%	0,00%		593	5.99%
F3.03	Rest-/Sperrmüll zu MVA	26.972	2,26%	4,53%	2,26%	2,26%	0,00%		1.616	5.99%
F4.01	heizwertreiche Fraktion	0	2,26%	4,53%	4,53%	0,00%	0,00%		0	6.79%
F4.02	heizwertarme Fraktion	0	2,26%	4,53%	4,53%	0,00%	0,00%		0	6.79%
F4.03	MBA Fe Schrott	12.468	6,84%	4,53%	2,26%	4,53%	13,67%		2.086	16,73%

Code	Flüsse	Massen	Zuverlässig-keit	Vollständig-keit	Zeitliche Korrelation	Geograph. Korrelation	Sonstige Korrelation	Expertenmeinung	Gesamt	
		[t]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[t]	[%]
F4.04	Flugasche	405	2,26%	4,53%	2,26%	0,00%	6,84%		36	8,80%
F4.05	Schlacke	26.567	2,26%	4,53%	2,26%	2,26%	0,00%		1.592	5,99%
F4.06	Schlacke Deponie	11.221	2,26%	1,13%	2,26%	2,26%	0,00%		395	4,08%
F4.07	MVA-BA Fe Schrott	16.895	6,84%	4,53%	2,26%	2,26%	13,67%		2.748	16,26%
F5.01	Schlacke	1.124						41,28%	464	41,28%
F5.02	Sekundäre Eisenmetalle	111.281	6,84%	6,84%	0,00%	0,00%	0,00%		10.759	9,67%

5. Schlussfolgerungen

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wurden im Jahr 2015 120.100 t Eisenmetalle (ohne EAGs) in Österreich über den Siedlungsabfall entsorgt, wovon 110.700 t (92%) recycelt wurden. Der größte Anteil wurde über die separate Sammlung von Altstoffen zurückgewonnen (69%).

Die nicht getrennt gesammelten Eisenmetalle werden über den Restmüll bzw. nach der Sperrmüllsammlung weiter mechanisch und thermisch behandelt. Etwa 27% (10.100 t) der im Rest- und Sperrmüll vorhandenen Eisenmetalle konnten nicht zurückgewonnen und der Metallindustrie daher nicht als Sekundärrohstoff zur Verfügung gestellt werden. Besonders hohe Verluste entstehen dabei während der Schlacke-Aufbereitung nach dem Verbrennungsprozess (9.700 t). In diesem Zusammenhang kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des Verbrennungsprozesses der Anteil kleiner Partikelgrößen und die Agglomerationen und Einschlüsse der Eisenmetall-Fraktionen zunehmen und diese bei der Magnetabscheidung nicht oder zumindest nicht ausreichend separiert werden (Breitenstein et al., 2015). Bei der Verbrennung werden etwa 1,5% (insgesamt 400 t) Eisenmetalle in der Flugasche aus der Rauchgasreinigung gefiltert, die deponiert oder als gefährlicher Abfall entsorgt werden.

Gemäß Anlagenbetreibern werden 10.100 t Eisenmetalle aus dem Restmüll in MBAs zurückgewonnen, was eine Rückgewinnungsrate von 100% bezogen auf die in MBAs eingebrachten Eisenmetalle aus dem Restmüll bedeutet. Dies erscheint jedoch sehr hoch, der Grund dafür könnte neben einer effektiven mechanischen Aufbereitung für Eisenmetalle vor allem daran liegen, dass bei der Rückgewinnung Bruttomengen ohne Ausweisung von Verlusten durch etwaige ausgewiesen werden. Die zurückgewonnenen Nettomengen könnten demnach bis zu 20% niedriger liegen, was eine Rückgewinnung von Eisenmetallen von etwa 90% aus der mechanischen Aufbereitung bedeuten würde.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten waren von unterschiedlicher Qualität, die mit entsprechenden Unsicherheiten bewertet wurden. Die Materialzusammensetzung von Rest- und Sperrmüll ist nur unzureichend dokumentiert, so dass der Anteil an Eisenmetallen (besonders was Nichtverpackungen betrifft) am Abfallaufkommen nicht genau bestimmbar ist. Bei der Rückgewinnung aus der Abfallaufbereitung fehlen genaue Angaben zu Mengen und Qualität der zurückgewonnenen Materialien.

Aussagen über die Materialqualität und -zusammensetzungen, wie Legierungen, konnten nicht getroffen werden, da weder Angaben zur Materialzusammensetzung der eingesetzten, noch der zurückgewonnenen Eisenmetalle vorlagen. Dies könnte aber Ausgangspunkt weiterführender Analysen sein.

In der Einleitung wurde der Gedanke einer Kreislaufwirtschaft, in dem „der in Produkten enthaltene Mehrwert so lange wie möglich erhalten bleibt und Abfälle immer wieder produktiv genutzt werden können und damit eine weitere Wertschöpfung ermöglichen“, beschrieben. Bei Recyclingraten von 90% wird das Prinzip eines geschlossenen Kreislaufes zwar nicht ganz erreicht, kommt diesem aber recht nahe.

Die von der EU vorgegebenen Ziele im Rahmen des Circular Economy Package, dass bis Ende 2025 mindestens 70% und bis Ende 2030 mindestens 80% der Verpackungen aus Eisenmetall stofflich verwertet werden müssen, werden mit 92,3% bereits erreicht. Über die Erreichung der Ziele für stoffliche Verwertungsquoten von

Siedlungsabfällen konnte anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit keine Aussage getroffen werden, da nur die Teilfraktion der Eisenmetalle und keine anderen Altstoffe untersucht wurde.

Da von der jährlich in den Siedlungsabfall eingebrachten Menge von 120.100 t (ohne EAGs) an Eisenmetallen 110.700 t recycelt werden, ergibt sich ein theoretisches, derzeit nicht genutztes Rückgewinnungspotential von etwa 10.000 t Eisenmetallen pro Jahr. Der Preis von Eisenschrott richtet sich neben den Notierungen an den Rohstoffbörsen auch nach der Reinheit und Qualität des Schrotts. Bei einem angenommenen Schrottpreis von 0,14 € pro kg für Mischschrott (Hönscheid, 2018) kann von einem Wiederverkaufswert von knapp 1,5 Mio. € pro Jahr bei 10.000 t Eisenschrott jährlich ausgegangen werden, der zur Zeit noch deponiert wird.

6. Ausblick und Empfehlungen

Zum Abschluss soll versucht werden, konkrete Handlungsempfehlungen für eine höhere Rückgewinnung von Eisenmetallen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen, die in Österreich über den Siedlungsabfall entsorgt werden, zu geben. Eine Übersicht der entsprechenden Vorschläge findet sich am Ende der Arbeit in Tabelle 15. Zusätzlich ist auch eine verbesserte Datenqualität wünschenswert, da die für die vorliegende Arbeit verwendeten Daten von unterschiedlicher Qualität waren, die die Genauigkeit der Erhebungen beeinflusst hat. Auch darauf soll im Folgenden eingegangen werden.

Um die Verluste aus der Abfallbehandlung reduzieren und damit höhere Recyclingraten erreichen zu können, erscheint eine weitere Verbesserung des separaten Sammelsystems für Altstoffe sinnvoll, da hier das größte verlustfreie Rückgewinnungspotential besteht. Dies könnte durch zusätzlich aufgestellte Sammelcontainer für Metalle, Aufklärungskampagnen der Bevölkerung zur Mülltrennung oder Einsatz sogenannter Waste-Watcher zur Beratung und Überprüfung bei der Mülltrennung geschehen.

Wenn die Eisenmetalle nicht gesammelt und damit einer weiteren Abfallaufbereitung zugeführt werden, ist als Folge einer thermischen Behandlung und den damit verbundenen Materialveränderungen und Agglomerationen bzw. aufgrund der aktuell eingesetzten Sortiertechnologien mit Verlusten zu rechnen. Hier könnte beispielsweise eine zusätzliche mechanische Behandlung einer Verbrennung vorgeschaltet werden. Des Weiteren wäre eine Investition in eine technologisch weiterentwickelte Sortieranlage mit verbesserter Magnetabscheidung (wie auch Abtrennung von NE-Metallen mittels anderer Technologien) und damit höheren Abscheidungsraten möglich. Dazu müssten allerdings Kosten-Nutzen-Rechnungen erstellt werden, was Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten sein könnte.

Zur Bestimmung der Recyclingquoten wird mit Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle eine Vereinheitlichung der Berechnungsmethoden vorgenommen und die Recyclingquote nur noch als die Menge bestimmt, die einem Recyclingverfahren zugeführt wird, abzüglich etwaiger Sortierverluste. Bisher wurden teilweise auch gesammelte oder zur Wiederaufbereitung gesendete Mengen als recycelte Mengen ausgegeben, was zukünftig nicht mehr möglich sein wird. Bis zu welchem Maße Verluste zukünftig akzeptiert und wie genau und einheitlich sie bewertet werden, muss der von der EU-Kommission zu delegierende Rechtsakt bis März 2019 zeigen.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Bestimmung der in Österreich über den Siedlungsabfall entsorgten Mengen an Eisenmetallen durch die separat gesammelten Mengen an Altstoffen und den aus Sortieranalysen geschätzten Anteilen an Eisenmetallen im Rest- und Sperrmüll. Die aus den Sortieranalysen gewonnenen Daten sind bisher bundesweit nicht einheitlich und meist auf Analysen von Verpackungsmaterialien beschränkt. Analysen zu Haushaltsschrott und der Materialzusammensetzung werden im Allgemeinen nicht vorgenommen. Dadurch ist die Datenlage zur Materialzusammensetzung des Siedlungsabfalls, insbesondere was Nichtverpackungen betrifft, schlecht. Hier kann von der angestrebten bundesweit vereinheitlichten Methodik zur Durchführung von Sortieranalysen eine Verbesserung der Datenlage erwartet werden. Inwieweit Analysen von Gewerbemüll notwendig und ökonomisch sinnvoll sind, muss im Einzelnen geklärt werden. Einer Schweizer Studie zufolge kann von einer ähnlichen Zusammensetzung von Siedlungsabfällen und gewerblichem Abfall in Bezug auf Metallgehalte ausgegangen werden (Morf, 2006).

Die Datenlage ist auch für die aus der Aufbereitung gewonnenen Eisenmetalle (MBA/MA und Schlackenaufbereitung nach der Müllverbrennung) verbesserungsbedürftig. Allgemein handelt es sich bei den übermittelten Daten um Bruttomengen inklusive Anhaftungen oder Verunreinigungen. Menge und Qualität der zurückgewonnenen Eisenmetalle werden oft nur geschätzt oder sind nicht oder nur begrenzt zugänglich. Die verschiedenen Aufbereitungsanlagen in Österreich verfügen über einen unterschiedlichen Stand der Technik, wobei die Rückgewinnung von der Anzahl und Qualität der Aufbereitungsschritte abhängt. Generell wären eine höhere Transparenz der Datenerfassung bei den Anlagenbetreibern und eine genauere Bewertung der aufbereiteten Materialien (Nettomengen) wünschenswert. Letzteres sollte möglich sein, da anzunehmen ist, dass die Metallindustrie etwaige Verluste der angekauften Mengen quantifiziert und verrechnet. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass die Schrottqualität die Höhe der Sekundärmarktpreise bestimmt. Die in der gegenständlichen Arbeit untersuchten Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen verwerten auch Rückstände aus der mechanischen Abfallaufbereitung, die aus der MBA, aber auch aus Anlagen zur Sortierung und Aufbereitung stammen. Dort werden neben Siedlungsabfällen auch andere für die Behandlung geeignete Abfälle verarbeitet. Hier wären Analysen zur stofflichen sowie chemischen Zusammensetzung dieser Abfälle wünschenswert.

Anzumerken ist noch, dass unklar ist, ob bei der Bestimmung der recycelten Mengen an Verpackungen aus Eisenmetall bei der Rückgewinnung aus der mechanischen und Schlacken-Aufbereitung zwischen Verpackungen und Nichtverpackungen unterschieden wird. Hier wäre eine größere Trennschärfe und Transparenz notwendig.

Für das Erreichen einer verbesserten Datenqualität muss ein höherer Aufwand betrieben werden, der meist mit höheren Kosten verbunden ist. Wie weit dies für die einzelnen Bereiche ökonomisch machbar und sinnvoll ist, muss im Einzelnen untersucht werden. Eine Kennzeichnung der Materialzusammensetzungen und -anteile, etwa bei Verpackungen, wäre durch eine konsequente Umsetzung der erweiterten Produzentenverantwortung umsetz- und realisierbar. Dadurch könnten über Marktanalysen und Lizensierungen die in Verkehr gebrachten Materialmengen bestimmt werden. Zudem sollte mehr Wert auf eine entsprechende Produktgestaltung (Ökodesign, Design-for-Recycling) gelegt werden und auf schwer zu rezyklierbare Verbundmaterialien, Legierungen etc., soweit möglich, verzichtet werden. Inwieweit dies politisch gewollt und umgesetzt werden könnte, ist fraglich, angesichts der generell fehlenden Diskussion um konkrete ressourcenschonende Maßnahmen, wie beispielsweise der Einführung eines Pfandsystems für Getränkedosen. Vielleicht

geben die Vorgaben und ambitionierten Ziele des Circular Economy Package einen entsprechend neuen Antrieb dazu.

Tabelle 15: Aus der vorliegenden Arbeit abgeleitete Maßnahmen zur Verbesserung der Rückgewinnung von Eisenmetallen und Verbesserung der Datenqualität

Maßnahmen zur Verbesserung der Rückgewinnung von Eisenmetallen:

- Sammelsysteme von Altstoffen
 - höhere Anzahl an Metallcontainern bzw. höhere Standortdichte (Bringsystem)
 - Aufklärung der Bevölkerung zur getrennten, sortenreinen Sammlung
 - Stichhaltige Kontrolle und Hilfestellung z.B. durch „Waste-Watcher“
- Schlackenaufbereitung
 - (zusätzliche) Rückgewinnung aus Rest-/Sperrmüll durch eine der Verbrennung vorgeschaltete Sortierung und mechanische Behandlung
 - verbesserte Magnetabscheidung und Sortiertechnologie für die Reststoffe nach der thermischen Behandlung

Maßnahmen zur Verbesserung der Datenlage und -qualität:

- Sortieranalysen
 - einheitliche und umfangreichere Analysen von Restmüll (bereits in Planung) für Verpackungen und Nichtverpackungen
 - zusätzliche Sortieranalysen von Gewerbeabfällen sowie von Sperrmüll aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen
- Berechnung der Recyclingquoten:
 - Vereinheitlichung der Bestimmung von Verlustquoten für sortierte Abfälle
 - Vereinheitlichung der Bestimmung von Verlustquoten aus Abfallaufbereitungsanlagen
 - Differenzierung der Rückgewinnungsmengen nach Verpackungen und Nichtverpackungen
 - Analyse der Zusammensetzung der unterschiedlichen Abfallarten
- Produktdesign
 - Transparente Kennzeichnung der Materialzusammensetzung und –mengen von im Verkehr gebrachten Produkten
 - Aufzeichnung (und Veröffentlichung) von Materialmengen und eingesetzten Rohstoffen in diversen Produktgruppen bzw. Branchen durch die produzierenden Firmen

Literaturverzeichnis

- Abl. L 150. (2018). Amtsblatt der Europäischen Union vom 14. Juni 2018 *Rechtsvorschriften*.
- ABV Westtirol. (2017). Fr. Weinseisen, Abfallverwertungsanlage Westtirol. Persönliche Mitteilung vom 10.04.2017, Roppen.
- Allwood, J. M., Cullen, J. M., Carruth, M. A., Cooper, D. R., McBrien, M., Milford, R. L., . . . Patel, A. C. (2012). *Sustainable materials: with both eyes open*: UIT Cambridge Cambridge.
- Am Ziegelofen. (2017). Fr. Kraftl, Prokuristin Abfallbehandlung und –verwertung „Am Ziegelofen“ GmbH. Persönliche Mitteilung vom 24.04.2017, St.Pölten.
- Amt der Kärntner Landesregierung (Ed.). (2012). Abfallwirtschaftskonzept des Landes Kärnten. 3. Fortschreibung 2012. In Dipl.-Ing. Michael Rabitsch (Ed.). Klagenfurt: Amt der Kärntner Landesregierung. Abteilung 8 (Kompetenzzentrum Umwelt, Wasserwirtschaft und Naturschutz).
- ARA. (2015). Materialverbunde. Technische Definition von Materialverbunden. Merkblatt.: Altstoff Recycling Austria AG.
- ARA. (2017). ARA Transparenzbericht 2016. Wien: Altstoff Recycling Austria.
- ARGE Abfallanalyse Oberösterreich 2013. (2014). Restabfallanalyse Oberösterreich 2013. In FHA – Gesellschaft für chemisch-technische Analytik GmbH (FHA GmbH), pulswerk GmbH, & Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH (TB Hauer) (Eds.), (pp. 143). Wien, Korneuburg.
- ARGE Hauer, FHA, & pulswerk. (2016). Wiener Altstoff- und Restmüllanalysen 2015/16. Endbericht vom April 2016. In Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH, Pulswerk GmbH – Beratungsunternehmen des Österreichischen Ökologie-Instituts, & FHA - Gesellschaft für chemisch-technische Analytik GmbH (Eds.). Korneuburg: Im Auftrag der Stadt Wien Magistratsabteilung 48.
- AWG. (2002). Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002), *StF: BGBl. I Nr. 102/2002, Fassung vom 06.07.2018*.
- AWV Hartberg. (2017). Hr. Pfeifer, Geschäftsführer Abfallwirtschaftsverband Hartberg. Persönliche Mitteilung vom 12.04.2017, St. Johann in der Haide.
- AWV Liezen. (2017). Hr. Bretterebner, Geschäftsführer Abfallwirtschaftsverband Liezen. Persönliche Mitteilung vom 12.04.2017, Liezen.
- AWV Osttirol. (2017). Hr. Bruner, Abfallbehandlung Lavant GmbH. Persönliche Mitteilung vom 06.04.2017, Lavant.
- AWV Schladming. (2017). Hr. Hinterschweiger, Abfallverwertungsanlage Aich. Persönliche Mitteilung vom 12.04.2017, Haus im Ennstal.
- Baker, H. K., Filbeck, G., & Harris, J. H. (2018). *Commodities: Markets, Performance, and Strategies*: Oxford University Press.
- BAWP. (2018). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017. Teil 1. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Stubenring 1, 1010 Wien.
- Berns, H., & Theisen, W. (2008). Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen. Heiselberg: Springer Verlag.

- BMLFUW. (2014). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2013. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien.
- BMLFUW. (2015). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2015. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien.
- Boku. (2011). Niederösterreichische Restmüllanalyse und Detailanalyse der Feinfraktion 2010-2011. In Amt der NÖ-Landesregierung, Gruppe Raumordnung Umwelt und Verkehr, Abt. Umwelt – und Energierecht (RU3), & Sachgebiet: Abfallwirtschaft und Ressourcenschonung (Eds.): Universität für Bodenkultur. Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt. Institut für Abfallwirtschaft.
- Brunner, P., Allesch, A., Getzner, M., Huber-Humer, M., Pomberger, R., Müller, W., . . . Kreindl, G. (2015). Benchmarking für die österreichische Abfallwirtschaft: Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft: Wien.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2017). Handbook of material flow analysis For Environment, Resource and Waste Engineers. Second Edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press.
- Clark, A., & Pucher, M. (2014). Herkunft und Zusammensetzung von Abfallstoffen (mit Fokus Kunststoffabfälle) in der Donau bei Wien: Bachelorarbeit der Studienrichtung Kulturtechnik und Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- Cooper, D. R., & Allwood, J. M. (2012). Reusing steel and aluminum components at end of product life. *Environmental science & technology*, 46(18), 10334-10340.
- Davis, J., Geyer, R., Ley, J., He, J., Clift, R., Kwan, A., . . . Jackson, T. (2007). Time-dependent material flow analysis of iron and steel in the UK: Part 2. Scrap generation and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(1), 118-140.
- Deike, R., Ebert, D., Warnecke, R., & Vogell, M. (2012). Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“.
- EC. (2005). Commission decision of 22 March 2005 establishing the formats relating to the database system pursuant to Directive 94/62/EC of the European Parliament and of the Council on packaging and packaging waste. In EUROPEAN COMMISSION (Ed.), L86/6 (Vol. Commission decision 2005/270/EC). Brussels.
- EC. (2008). Directive 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. In EUROPEAN COMMISSION (Ed.), L312/3 (Vol. DIRECTIVE 2008/98/EC). Brussels.
- EC. (2014). Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe
COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. In EUROPEAN COMMISSION (Ed.), COM(2014) 398 final/ (Vol. COM(2014) 398 final/). Brussels.
- EC. (2015). Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2008/98/EC on waste. In EUROPEAN COMMISSION (Ed.), 2015/0275 (COD) (Vol. COM(2015) 595 final). Brussels.

- EDM. (2017). Haushaltsverpackungen. Marktanteile Veröffentlichung, <https://secure.umweltbundesamt.at/eVerpackung/veroeffentlichung.xhtml> (Zugriff am 05. 10. 2017).
- Elektroaltgeräteverordnung. (2005). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von elektrischen und elektronischen Altgeräten (Elektroaltgeräteverordnung – EAG-VO) *StF: BGBl. II Nr. 121/2005, Fassung vom 17.07.2018*.
- ENAGES. (2017). Hr. Pusterhofer, Technischer Geschäftsführer Energie- und Abfallverwertungsgesellschaft GmbH. Persönliche Mitteilung vom 03.02.2017, Niklasdorf.
- Energie AG. (2017). Hr. Gruber, Produktion /Betriebsleitung MVA Energie AG Oberösterreich Umwelt Service GmbH. Persönliche Mitteilung vom 25.01.2017, Hörsching.
- EUROSTAT. (2017). Generation and treatment of Municipal waste, by country, year and treatment type, in thousand tonnes, kg per inhabitant <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/transboundary-waste-shipments/key-waste-streams/municipal-waste> (Zugriff am 18. 01. 2018).
- EVN. (2016). Abfallverwertung Niederösterreich, MVA Dürnrohr. Umwelterklärung 2016.
- Fenton, M. D. (2003). *Iron and steel recycling in the United States in 1998*: US Department of the interior, US Geological survey.
- Frischenschlager, H., Karigl, B., Lampert, C., Pölz, W., Schindler, I., Tesar, M., . . . Winter, B. (2010). Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Endbericht des Lebensministeriums (Vol. REP-0303). Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- Gara, S., & Schrimpf, S. (1998). Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie. Wien: Umweltbundesamt.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Gottstein, G. (2014). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*: Springer-Verlag.
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J. P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., . . . Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 355-366.
- Happenhofer, A. (2017). Entwicklung einer einheitlichen Methodik zur Planung und Durchführung von Restmüll- Sortieranalysen. Vortrag am 16. 03. 2018 beim 8. Wissenschaftskongress, Abfall- und Ressourcenwirtschaft der DGAW in Wien.
- Hauer, W., A.C. Nielsen, & Österreichisches Institut für Verpackungswesen. (2015). Verpackungsaufkommen in Österreich 2013. Endbericht 29.6.2015. Korneuburg.
- Hauer, W., & FHA. (2010). Restmüllanalysen Tirol 2010 In Amt der Tiroler Landesregierung (Ed.), (pp. 47). Korneuburg: Technisches Büro für Umweltschutz GmbH.
- Helmus, M., & Randel, A. (2014). Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen. Wuppertal.
- Hönscheid, T. (2018). Schrott ist wertvoller als so mancher denkt, <https://www.schrottpreis.org/> (Zugriff am 30. 04. 2018).

- Huber-Humer, M., Beigl, P., & Schmied, E. (2018). Abfallwirtschaftspolitik. ReUse und der informelle Sektor in der Abfallwirtschaft - rechtlicher Graubereich? *Vorlesung und Seminar. Institut für Abfallwirtschaft (ABF-BOKU)*.
- Huber, F., Herzel, H., Adam, C., Mallow, O., Blasenbauer, D., & Fellner, J. (2017). Combined disc pelletisation and thermal treatment of MSWI fly ash. *Waste Management*.
- IUT, & SDAG. (2014). Sortieranaysen für Restmüll aus der Steiermark. Endbericht. In Ingenieurgemeinschaft Innovative Umwelttechnik GmbH & Saubermacher Dienstleistungs AG (Eds.): Amt der Steiermärkischen Landesregierung. A14 Referat Abfallwirtschaft und Nachhaltigkeit.
- Kalusche, W. (2004). Lebensdauer von Bauteilen und wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Gebäudes.
- KRV. (2017). Hr. Zellinger, Geschäftsführer Kärntner Restmüllverwertungs GmbH . Persönliche Mitteilung vom 24.01.2017, Arnoldstein.
- KRV. (2018). Technische Daten Müllverbrennungsanlage, http://www.krv.co.at/default2.asp?active_page_id=303&parent_page_id=91&pparent_page_id=1 (Zugriff am 09. 08. 2018).
- Land Salzburg. (2013). Restmüllanalyse 2012 *Email: 2016-12-19*.
- Laner, D., Feketitsch, J., Rechberger, H., & Fellner, J. (2016). A Novel Approach to Characterize Data Uncertainty in Material Flow Analysis and its Application to Plastics Flows in Austria. *Journal of Industrial Ecology*, 20(5), 14.
- Lechner, P., & Huber-Humer, M. (2010). Abfallwirtschaft und Abfallentsorgung *Vorlesung und Übung. Institut für Abfallwirtschaft (ABF-BOKU)*.
- Lechner, P., Mostbauer, P., & Böhm, K. (2010). Grundlagen für die Verwertung von MV-Rostasche. Wien: Boku, Institut für Abfallwirtschaft.
- Linz AG (2017). Hr. Hinterstoissner, Umweltmanagement Linz AG. Persönliche Mitteilung vom 24.01.2017, Linz.
- Linzner, R., Pertl, A., Scherhauser, S., Schmied, E., & Obersteiner, G. (2013). Parallelwelten - Informelle Arbeit in der Abfallwirtschaft. *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 65(1-2), 34-41.
- Lutter, S., Giljum, S., & Randles, M. (2016). Regionale Kreislaufwirtschaft. Inputpapier für die Implementierung von RESET2020. Wien: Forschungsgruppe „Nachhaltige Ressourcennutzung“. Institute for Ecological Economics Wirtschaftsuniversität Wien (WU).
- Meyer, I., Sommer, M., Kratena, K., Tesar, M., & Neubauer, C. (2016). Volkswirtschaftliche Effekte durch Recycling ausgewählter Altstoffe und Abfälle. Wien: Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung. Umweltbundesamt GmbH.
- Morf, L. (2006). Chemische Zusammensetzung verbrannter Siedlungsabfälle. Untersuchungen im Einzugsgebiet der KVA Thurgau *Umwelt-Wissen Nr. 0620* (pp. 104). Bern: Bundesamt für Umwel.
- Neubauer, C. (2017). Umweltbundesamt. Metallabfälle BAWP *Email 2018-05-07*.
- Neubauer, C., & Öhlinger, A. (2008). Mechanische Abfallbehandlung (MA) von gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen in Österreich. Anlagenstandorte 2007. Endbericht

- REP-0160. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, 1010 Wien.
- OÖ Nachrichten. (2018). Mit Urban Mining werden pro Jahr 12,2 Millionen Tonnen CO₂ gespart, <https://www.nachrichten.at/nachrichten/wirtschaft/wirtschaftsraumooe/Mit-Urban-Mining-werden-pro-Jahr-12-2-Millionen-Tonnen-CO2-gespart;art467,705309> (Zugriff am 19. 07. 2018).
- Prisching, M. (2017). [Betriebsleiter Rinterzelt, MA 48]. Persönliche Mitteilung 14. 12. 2017, Wien
- PROPAK. (2017). PROPAK Verpackungssektor. Das Meistverwendete unter den Materialien, <http://www.propak.at/verpackung/propak-verpackungssektor> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Purgar, A., Huber, F., Blasenbauer, D., & Winter, F. (2016). Alternative Methoden zur Behandlung von Müllverbrennungsflugaschen. *ÖIAZ, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 161(1-12), 75-81.
- Reck, B. K., Chambon, M., Hashimoto, S., & Graedel, T. (2010). Global stainless steel cycle exemplifies China's rise to metal dominance. *Environmental science & technology*, 44(10), 3940-3946.
- Roos, E., & Maile, K. (2008). Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Heidelberg: Springer Verlag.
- Rottner Deponie. (2017). Hr. Kohl, Rottner Deponie. Persönliche Mitteilung vom 13.04.2017, Fischamend.
- RZ Ahrental. (2017). Hr. Leitgeb, Betriebsleiter Abfallbehandlung Ahrental GmbH. Persönliche Mitteilung vom 24.04.2017, Innsbruck.
- Schaffartzik, A., Eisenmenger, N., Fridolin, K., & Milota, E. (2015). Ressourcennutzung in Österreich. Bericht 2015. *Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Abteilung Energie- und Wirtschaftspolitik (Abt. I/2)*.
- Schmid, H. (2017). Voestalpine Stahl GmbH. Persönliche Mitteilung, 18.12.2017.
- Schwarzböck, T., & Fellner, J. (2015). Bestimmung der fossilen Kohlendioxidemissionen aus Österreichischen Müllverbrennungsanlagen (BEFKÖM). *Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, (unveröffentlichter Bericht)*.
- Servus Abfall. (2017). Hr. Drawetz, Betriebsleiter MBA Frohnleiten. Persönliche Mitteilung vom 24.04.2017, Graz.
- Stadt Wien. (2017). Hr. Reiselhuber, Leiter Deponie Abfallwirtschaft und Stoffstrommanagement. Magistrat der Stadt Wien. MA 48, Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark. Persönliche Mitteilung vom 03.03.2017, Wien.
- Stadt Wien MA 48. (2016). Jahresbericht 2015 - Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark. In Abteilungsleiter DI Josef Thöni (Ed.). Wien: Stadt Wien – MA 48 – Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark, März 2016.
- Thöni. (2017). Hr. Berger, stellvertr. Betriebsleiter Thöni Industriebetriebe GmbH Umwelt Energietechnik. Persönliche Mitteilung vom 06.04.2017, Telfs.

- UBA. (2018). Abfallbehandlung, <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/abfall/behandlung/> (Zugriff am 18. 07. 2018).
- UDB. (2017). Umwelterklärung 2017. Oberpullendorf: UDB Umweltdienst Burgenland GmbH.
- Umweltschutzanlagen Siggerwiesen. (2015). Geschäftsbericht der Salzburger Abfallbeseitigung 2015.
- Van Eygen, E., Feketitsch, J., Laner, D., Rechberger, H., & Fellner, J. (2017). Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 183-194.
- Verpackungsverordnung. (2014). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten (Verpackungsverordnung 2014) *StF: BGBl. II Nr. 184/2014, Fassung vom 06.07.2018*.
- Warrings, R. (2017). Besichtigung Aufbereitungsanlage Rinterzelt am 16. 03. 2017 in Wien. *Persönliches Fotomaterial*.
- Warrings, R., & Fellner, J. (2018). Current status of circularity for aluminium from household waste in Austria. *Waste Management Journal*.
- Wien Energie. (2018). Müllverbrennungsanlage Spittelau, <https://www.wienenergie.at/eportal3/ep/channelView.do/channelId/-49106> (Zugriff am 07-18 2018).
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2018). Roheisen- und Rohstahlerzeugung, <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/> (Zugriff am 19. 07. 2018).
- WNSKS. (2017). Hr. Wiesmüller, Betriebsleiter Wiener Neustädter Stadtwerke und Kommunal Service GmbH, Abteilung Abfallwirtschaft. Persönliche Mitteilung vom 04.04.2017, Wr.Neustadt.
- ZEMKA. (2017). Hr. Winter, Geschäftsführer. Persönliche Mitteilung vom 30.03.2017, Zell am See.